

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



PROYECTO FIN DE CARRERA

INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL DE ELÉCTRICIDAD

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL
CÁLCULO DE LA CAPACIDAD DE
TRANSPORTE PARA CABLE SUBTERRÁNEOS
DE POTENCIA SEGÚN LA NORMA UNE 21144

Autor: Carlos Cabañas Zurita

Tutor: Víctor Julián Hernández Jiménez

Leganés, Junio de 2011

Título: APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL CÁLCULO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE PARA CABLE SUBTERRÁNEOS DE POTENCIA SEGÚN LA NORMA UNE 21144

Autor: CARLOS CABAÑAS ZURITA

Tutor: VÍCTOR JULIÁN HERNÁNDEZ JIMÉNEZ

EL TRIBUNAL

Presidente: _____

Vocal: _____

Secretario: _____

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día ____ de _____ de 2011 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

Resumen

El presente trabajo tiene como propósito el desarrollo de una aplicación informática que permita el cálculo de la capacidad de transporte en cables subterráneos de potencia, así como los parámetros secundarios necesarios para obtener la intensidad admisible: resistencia eléctrica del conductor, pérdidas dieléctricas, pérdidas en la pantalla metálica y las diferentes resistividades térmicas.

La aplicación informática desarrollada esta basada en la Norma UNE 21144, en la que se detallan los métodos para el cálculo de la intensidad admisible en cables eléctricos, por ello ha sido necesario realizar un estudio profundo de esta Norma, así como de los distintos componentes de los cables subterráneos y sus instalaciones.

La aplicación informática está dirigida al tratamiento de cables unipolares de media y alta tensión, con aislamiento polimérico, directamente enterrados en el terreno; las especificaciones concretas de los casos que abarca la aplicación están detallados en esta memoria.

La aplicación ha sido creada con el entorno de programación Microsoft Visual Basic 2008 Express Edition, tratando de realizar un interfaz visual para una ejecución intuitiva por parte del usuario.

La ejecución de la aplicación consiste en introducir los parámetros constructivos del cable, parámetros eléctricos y parámetros referentes al tipo de instalación para obtener la intensidad admisible y los parámetros secundarios mencionados anteriormente. Adicionalmente la aplicación incluye una librería de cables e instalaciones que sirve como orientación para el usuario.

Abstract

The aim of this work was the development of application software to calculate the ampacity of underground power cables, and the secondary parameters needed to obtain the ampacity: conductor electrical resistance, dielectric losses, losses in the sheath and different thermal resistivities.

The application software was developed according to the Standard UNE 21144, which explains in detail the methodology to calculate the ampacity in electric cables. Therefore, a deep analysis of the rule and a comprehensive study about underground cables and their installations have been done.

The application software is related to the treatment of monopolar cables of medium and high voltage, with polymeric isolation, directly buried in the ground; the specific parameters of every case included in the software are shown detailed in this report.

The software has been made under the programming environment Microsoft Visual Basic 2008 Express Edition, aiming to create an intuitive and user-friendly interface.

The use of the software consist in the introduction of the constructive parameters of the cable, electrical parameters and parameters regarding the type of installation to obtain the ampacity and the secondary parameters listed before. Additionally, the software includes a library of cables and installations as an orientation for the user.

Índice general

INTRODUCCIÓN.....	1
1. CABLES SUBTERRÁNEOS. COMPONENTES Y DISPOSICIÓN.....	3
1.1 Componentes de los cables	3
1.1.1 Conductor	5
1.1.2 Aislamiento	6
1.1.3 Capas semiconductoras	8
1.1.4 Pantalla.....	8
1.1.5 Armadura	10
1.1.6 Cubierta exterior.....	11
1.2 Disposición del cable subterráneo.....	11
1.2.1 Cables directamente enterrados	11
1.2.2 Cables dispuestos en bancos de ductos.....	12
2. CÁLCULO DE LA INTENSIDAD ADMISIBLE. NORMA UNE 21144.....	13
2.1 Fundamentos teóricos.....	13
2.1.1 Resistencia térmica	14
2.1.2 Pérdidas eléctricas.....	14
2.1.3 Pérdidas dieléctricas	18
2.2 Norma UNE 21144	18
2.2.1 Introducción.....	18
2.2.2 Parte 1: Ecuaciones de intensidad admisible y cálculo de pérdidas.....	20
2.2.3 Parte 2: Resistencia térmica	25
2.2.4 Parte 3: Secciones sobre condiciones de funcionamiento	29
3. DISEÑO DE LA APLICACIÓN	31
3.1 Manual de Usuario	31
3.1.1 Ventana principal.....	33
3.1.2 Ventana Librería de cables e instalaciones	40
3.1.3 Ventana Aspectos técnicos del cálculo	42
3.1.4 Ventana Resultados.....	43
3.2 Aspectos técnicos del cálculo.....	45
3.2.1 Cálculo de R	47
3.2.2 Cálculo de W_d	49
3.2.3 Cálculo de λ_1	49
3.2.4 Cálculo de T_1 y T_3	51
3.2.5 Cálculo de T_4	51

4. VALIDACIÓN DE LA APLICACIÓN	53
4.1 Validación	53
4.1.1 <i>Variación de la temperatura del terreno</i>	56
4.1.2 <i>Variación de la resistividad térmica del terreno</i>	57
4.1.3 <i>Variación de la profundidad de tendido</i>	59
4.2 Resultados	60
CONCLUSIONES	
REFERENCIAS	

Índice de figuras

Figura 1. Componentes de los cables subterráneos.....	4
Figura 2. Tipos de diseño de conductores	5
Figura 3. Cable con aislamiento polimérico de XLPE.....	6
Figura 4. Cables con aislamiento de papel impregnado en aceite.....	7
Figura 5. Conexión de pantallas Both ends.....	9
Figura 6. Conexión de pantallas Single point	9
Figura 7. Conexión de pantallas Crossbonding.....	10
Figura 8. Varias instalaciones de cables directamente enterrados	11
Figura 9. Bancos de ductos	12
Figura 10. Modelo térmico-eléctrico de un cable	14
Figura 11. Efecto pelicular para diferentes frecuencias. La corriente se muestra en azul. 16	
Figura 12. Efecto proximidad. Corriente en amarillo; campo magnético en azul.	16
Figura 13. Conexión de pantallas permutada de secciones idénticas.....	17
Figura 14. Cables unipolares al aire dispuestos en forma de cuadrícula	28
Figura 15. Cables en tresbolillo al aire en forma de cuadrícula.....	28
Figura 16. Archivo ejecutable de la aplicación.....	32
Figura 17. Ventana inicial de la aplicación	32
Figura 18. Subpestaña: Conductor	35
Figura 19. Subpestaña: Aislante.....	36
Figura 20. Subpestaña: Pantalla	37
Figura 21. Subpestaña: Cubierta exterior.....	38
Figura 22. Pestaña: Instalación del cable y parámetros del terreno	40
Figura 23. Ventana: Librería de cables e instalaciones.....	41
Figura 24. Ventana: Aspectos técnicos del cálculo.....	42
Figura 25. Ventana: Resultados (para disposiciones en tresbolillo)	44
Figura 26. Ventana: Resultados (para disposiciones en capa)	44
Figura 27. Esquema del cálculo de Intensidad admisible	46
Figura 28. Esquema del cálculo de R	48
Figura 29. Esquema del cálculo de W_d	49
Figura 30. Esquema del cálculo de λ_1	50
Figura 31. Esquema del cálculo de T_1 y T_3	51
Figura 32. Esquema del cálculo de T_4	52

Figura 33. Comparativa de intensidades en función de la temperatura del terreno para el cable de cobre.....	56
Figura 34. Comparativa de intensidades en función de la temperatura del terreno para el cable de aluminio.	57
Figura 35. Comparativa de intensidades en función de la resistividad térmica del terreno para el cable de cobre.	58
Figura 36. Comparativa de intensidades en función de la resistividad térmica del terreno para el cable de aluminio.....	58
Figura 37. Comparativa de intensidades en función de la profundidad de tendido para el cable de cobre.	59
Figura 38. Comparativa de intensidades en función de la profundidad de tendido para el cable de aluminio.	60

Índice de tablas

Tabla 1. Cables de distribución de 3,6/6 kV a 18/30 kV. Aislamiento XLPE y conductor de cobre. Norma UNE 211435	54
Tabla 2. Condiciones tipo de instalación reglada por la Norma UNE 211435	54
Tabla 3. Diferencias entre intensidad admisible de la Norma UNE 211435 y la calculada.	55
Tabla 4. Variación de intensidades en función de la temperatura del terreno	56
Tabla 5. Variación de intensidades en función de la resistividad térmica del terreno del terreno	57
Tabla 6. Variación de intensidades en función de la de tendido	59
Tabla 7. Desviación media de intensidades para ambos cables	60
Tabla 8. R_0 obtenido de la Norma UNE-EN 60228 frente a R_0 calculado por la aplicación	61
Tabla 9. Repercusión de R_0 sobre las intensidades obtenidas.....	61

Índice de ecuaciones

Ecuación 1: Pérdidas por efecto Joule en el conductor	15
Ecuación 2: Resistencia eléctrica en un cable	15
Ecuación 3: Expresión del calentamiento en el conductor para cables de corriente alterna enterrados donde la desecación del suelo no existe o los cables están en el aire.....	21
Ecuación 4: Intensidad admisible para cables de corriente alterna enterrados donde la desecación del suelo no existe o los cables están en el aire.	21
Ecuación 5: Resistencia eléctrica del conductor en corriente alterna	21
Ecuación 6: Resistencia eléctrica del conductor en corriente alterna a 20°C	22
Ecuación 7: Factor de efecto pelicular	22
Ecuación 8: Factor de efecto proximidad.....	22
Ecuación 9: Pérdidas dieléctricas	22
Ecuación 10: Relación de pérdidas totales en la pantalla respecto a las pérdidas totales en el conductor	23
Ecuación 11: Relación de pérdidas en la pantalla respecto a las pérdidas totales en el conductor para tres cables con pantallas en cortocircuito en ambas extremidades...	23
Ecuación 12: Relación de pérdidas totales en la armadura respecto a las pérdidas totales en el conductor para cables bipolares con armadura de alambres de acero	24
Ecuación 13: factor de pérdidas de la cubierta para un ambiente de baja resistencia, en un circuito doble.....	25
Ecuación 14: Resistencia térmica entre conductor y envolvente para cables unipolares..	26
Ecuación 15: Resistencia térmica entre cubierta y armadura para cables unipolares, bipolares o tripolares con cubierta metálica en común	26
Ecuación 16: Resistencia térmica del revestimiento o cubierta exterior.....	27
Ecuación 17: Resistencia térmica externa para cables con cubierta metálica	27

Glosario de términos

A	sección de la armadura (mm^2).
C	capacidad por fase (F/m).
D_a'	diámetro exterior de la armadura (mm).
D_e	diámetro exterior del cable (mm)
D_i	diámetro sobre el aislamiento (mm)
D_s	diámetro exterior de la cubierta (mm)
G_s	es el coeficiente que representa las pérdidas por corriente de Foucault en el espesor de la cubierta, debidos a las corrientes en el conductor.
I	intensidad de la corriente en un conductor (valor eficaz) (A).
L	profundidad de tendido, medida desde el eje del cable o el centro de la formación en tresbolillo (mm)
R	resistencia eléctrica del conductor bajo los efectos de la corriente alterna a su temperatura máxima de servicio (Ω/m).
R_A	resistencia de la armadura en corriente alterna (Ω/m).
R_s	resistencia de la cubierta metálica o de la pantalla (Ω/m).
R'	resistencia eléctrica del conductor con corriente continua a la temperatura máxima de servicio (Ω/m).
R_0	resistencia eléctrica del conductor en corriente continua a 20 °C (Ω/m).
T_1	resistencia térmica, por unidad de longitud, del aislamiento que rodea al conductor (W/m).
T_2	resistencia térmica, por unidad de longitud, del relleno de asiento entre la envolvente y la armadura ($\text{K}\cdot\text{m}/\text{W}$).
T_3	resistencia térmica, por unidad de longitud, del revestimiento exterior del cable ($\text{K}\cdot\text{m}/\text{W}$).
T_4	resistencia térmica, por unidad de longitud, entre la superficie del cable y el medio circundante, tal y como se deducirá en la Parte 2 de la norma ($\text{K}\cdot\text{m}/\text{W}$).
U_0	tensión entre conductor y pantalla metálica (V).
W_c	pérdidas disipadas en el conductor por unidad de longitud (W/m)
W_d	pérdidas dieléctricas, por unidad de longitud, del aislamiento que rodea al conductor (W/m).
X_l	reactancia de la cubierta metálica o de la pantalla, por unidad de longitud de cable (Ω/m).

d	diámetro medio de la pantalla (mm).
d_c	diámetro del conductor (mm).
d_A	diámetro medio de la armadura (mm).
f	frecuencia de red (Hz).
g_s	coeficiente que representa las pérdidas por corrientes de Foucault en el espesor de la cubierta, debidas a las corrientes en cables contiguos.
k_p	factor utilizado para el cálculo de x_p (efecto de proximidad).
k_s	factor utilizado para el cálculo de x_s (efecto pelicular).
n	número de conductores aislados en servicio en el cable (conductores de la misma sección y transportando la misma carga).
r_l	radio circunscrito a los conductores (mm).
s	distancia entre ejes de conductores (mm).
t_1	espesor del aislamiento entre conductor y envolvente (mm).
t_2	espesor del asiento de la armadura (mm).
t_3	espesor del revestimiento exterior (mm).
t	espesor del aislamiento entre conductores (mm).
y_p	factor de efecto de proximidad
y_s	factor de efecto pelicular.
α_{20}	coeficiente de variación de la resistividad eléctrica con la temperatura a 20°C, por Kelvin (1/K)
$tg \delta$	factor de pérdidas del aislamiento a la frecuencia y a la temperatura de servicio.
θ	temperatura máxima de servicio del conductor (°C)
$\Delta\theta$	calentamiento admisible del conductor con relación a la temperatura ambiente (K).
λ_0	factor de pérdidas de la cubierta para una cubierta de alta resistencia, en un circuito único.
λ_1	relación de las pérdidas en la cubierta metálica o pantalla con respecto a las pérdidas totales en todos los conductores de ese cable.
λ_2	relación de las pérdidas en la armadura respecto a las pérdidas totales en todos los conductores de ese cable.
λ'_1	relación de las pérdidas de la cubierta metálica o pantalla producidas por las corrientes de circulación en la cubierta metálica o pantalla respecto a las pérdidas el conductor.
λ''_1	relación de las pérdidas de la cubierta metálica o pantalla producidas por las corrientes de Foucault respecto a las pérdidas el conductor.
λ''_{1d}	factor de pérdidas de la cubierta para un ambiente de baja resistencia, en un circuito doble.
ρ_T	resistividad térmica del material (K·m/W).
ω	pulsación (frecuencia angular $2\pi f$)

Introducción

Cuando se realiza el diseño de una instalación eléctrica es muy importante la elección de un cable adecuado, que con el menor coste posible pueda soportar la corriente que ha de circular por la línea sin que sufra daños ningún elemento de la instalación; así mismo, es imprescindible que la elección de dicho cable se realice acorde con la normativa vigente. La norma española que regula los cálculos de la intensidad admisible para cables eléctricos es la Norma UNE 21144.

Con este proyecto se pretende crear una aplicación informática que facilite al usuario la elección del cable adecuado para la instalación prevista cumpliendo con la normativa vigente al respecto. Para ello la aplicación desarrollada simplifica los cálculos de la intensidad admisible para los cables y el tipo de instalación propuesta por el usuario.

El desarrollo del proyecto comenzó con una fase de recopilación de información sobre los cables eléctricos de potencia y el cálculo de la capacidad de transporte para estos cables. Una vez que se determinó que en la Norma UNE 21144 se recopilan todos los aspectos necesarios para el cálculo de la intensidad admisible, se examinó a fondo la Norma y se elaboró una casuística para la aplicación informática. Posteriormente comenzó la fase de programación de la aplicación y finalmente una validación de ésta.

En el Capítulo 1 de la memoria se explican las características y funciones de los principales componentes de los cables subterráneos de media y alta tensión, definiendo los materiales y construcciones habituales. También se reflejan las posibles instalaciones subterráneas en las que se encuentran los cables subterráneos.

El Capítulo 2 introduce al lector en los conceptos y fundamentos teóricos necesarios para el cálculo de la intensidad admisible. A continuación se resume cada una de las

secciones de la Norma UNE 21144, exponiendo los métodos para el cálculo de la intensidad admisible y los casos que abarca.

En el Capítulo 3 se desarrolla un manual de usuario para la aplicación informática creada, en el cuál se explica el método para su correcta ejecución y todas las funciones que comprende. Posteriormente se muestran las pautas seguidas por la aplicación para realizar el cálculo de la intensidad admisible para los distintos casos que comprende, haciendo referencia a los métodos de la Norma UNE 21144.

En el cuarto y último Capítulo se realiza una validación de la aplicación desarrollada comparando los resultados logrados con resultados obtenidos a partir de tablas y factores de corrección de la Norma UNE 211435.

Capítulo 1

Cables subterráneos. Componentes y disposición

En este capítulo se explicarán las funciones, formas constructivas y materiales habituales de los principales componentes de los cables subterráneos. También se comentarán los tipos de instalaciones en las que se suelen colocar estos cables.

1.1 Componentes de los cables

Los cables eléctricos pueden presentarse de formas muy variadas en función del uso para el que estén destinados.

Para los cables subterráneos, pueden formarse tres clasificaciones según los siguientes parámetros:

- Tensión aplicada: los cables pueden ser de baja tensión (hasta 1 kV), media tensión (entre 1 y 30 kV), alta tensión (hasta 132 kV) y muy alta tensión (tensiones superiores a 132 kV).

- Número de conductores: el cable puede ser unipolar (un solo conductor), bipolar (dos conductores) o tripolar (tres fases en el mismo cable).
- Aislamiento: se diferencian dos tecnologías, el aislamiento seco y el aislamiento de papel. En el apartado 1.1.2 se desarrollan estos tipos de aislamiento.

Los cables subterráneos se componen de, al menos, dos elementos fundamentales: el conductor eléctrico, que transporta la energía eléctrica, y el aislante principal. Los cables subterráneos de potencia suelen estar compuestos por más elementos que tienen funciones tales como proteger al cable de los agentes externos, ofrecer protección mecánica adicional, dar forma radial al campo, proporcionar una referencia a tierra, etc.

En la siguiente figura puede observarse la composición de tres ejemplos de cable subterráneo.



Figura 1. Componentes de los cables subterráneos

A continuación se expondrán los diferentes componentes utilizados comúnmente en cables subterráneos de media y alta tensión.

1.1.1 Conductor

El conductor es el elemento central de los cables, de carácter metálico. El conductor tiene como función principal el transporte de la corriente en régimen normal, en sobrecarga y en cortocircuito. El conductor también tiene la función mecánica de soportar los esfuerzos longitudinales del tendido del cable.

El conductor debe tener una buena conductividad y una superficie exterior regular. Por ello, generalmente los materiales empleados son el cobre templado de alta conductividad y el aluminio de pureza superior al 99,5%. Las características eléctricas y mecánicas del cobre son mejores que las del aluminio, como contrapartida el aluminio cuenta con mayor ligereza y menor coste que el cobre.

El conductor, puede estar formado por un alambre o varios. Un mayor número de alambres otorga mayor flexibilidad al cable. En la Norma UNE-EN 60228 se especifican clases de conductores, que van desde la Clase 1 (rígidos) hasta la Clase 6 (flexibles).

Generalmente pueden encontrarse tres tipos de diseño de conductores: los cableados de alambres redondos (ensamblados concéntricamente en hélice para reducir el efecto proximidad), los cableados compactos (comprimidos para obtener una superficie más lisa y uniforme) y los segmentados (varios conductores de sección sectorial, cuyo conjunto forma una sección cilíndrica). En la Figura 2 pueden observarse los tres tipos de diseño de conductores en el orden nombrado.

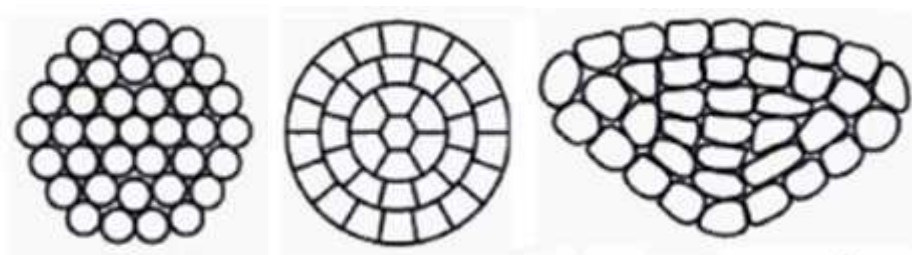


Figura 2. Tipos de diseño de conductores

1.1.2 Aislamiento

La función del material aislante es confinar la corriente eléctrica en la sección del conductor y controlar el campo eléctrico soportando el gradiente de tensión. El aislante debe ser capaz de soportar el régimen permanente de circulación así como voltajes transitorios, sin que se produzca la ruptura dieléctrica del medio.

La temperatura máxima que pueda soportar el aislamiento, determinará la capacidad de transporte nominal del cable. Superada esta temperatura se puede dañar el aislamiento provocando un envejecimiento acelerado del cable.

El material aislante puede dividirse en dos grandes familias, el aislamiento seco y el aislamiento de papel.

1.1.2.1 Aislamiento seco

El aislamiento seco está formado por material polimérico extruido. Los materiales más comunes son el XLPE (polietileno reticulado), el EPR (etileno propileno), el PE (polietileno) y el PVC (policloruro de vinilo).

El tipo de plástico más utilizado en alta tensión es el XLPE, siendo habituales para media tensión el EPR y el PE.

Las impurezas y la entrada de humedad son dos peligros asociados a los aislamientos secos que reducen la rigidez dieléctrica.

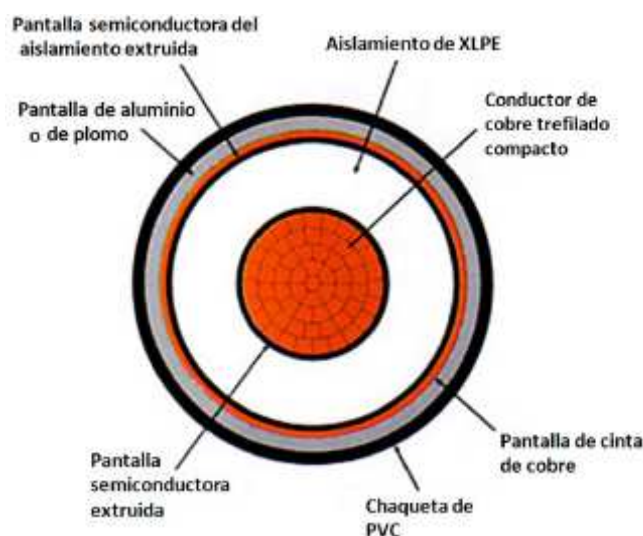


Figura 3. Cable con aislamiento polimérico de XLPE

1.1 Componentes de los cables

1.1.2.2 Aislamiento de papel

Los aislamientos de papel están formados por capas encintadas de fibra celulosa impregnadas en aceite. Este tipo de aislamiento ofrece unas excelentes características mecánicas y eléctricas. Pueden encontrarse dos tipos de configuraciones:

- Aceite fluido (OF - oil filled): en este tipo de cables, el aceite circula por el interior del conductor, impregnando a su vez el papel del aislamiento.
- Impregnación en masa (Mass impregnated): El aceite en este tipo de aislamiento se encuentra estático en las capas de papel.

Existe una variante de estos aislamientos que combina capas de papel con capas de polipropileno intercaladas. Este aislamiento es conocido como PPLP y su uso se restringe a líneas de muy alta tensión debido a su elevado coste.

La pérdida de impregnación del papel, supone un riesgo grave para estos aislamientos.

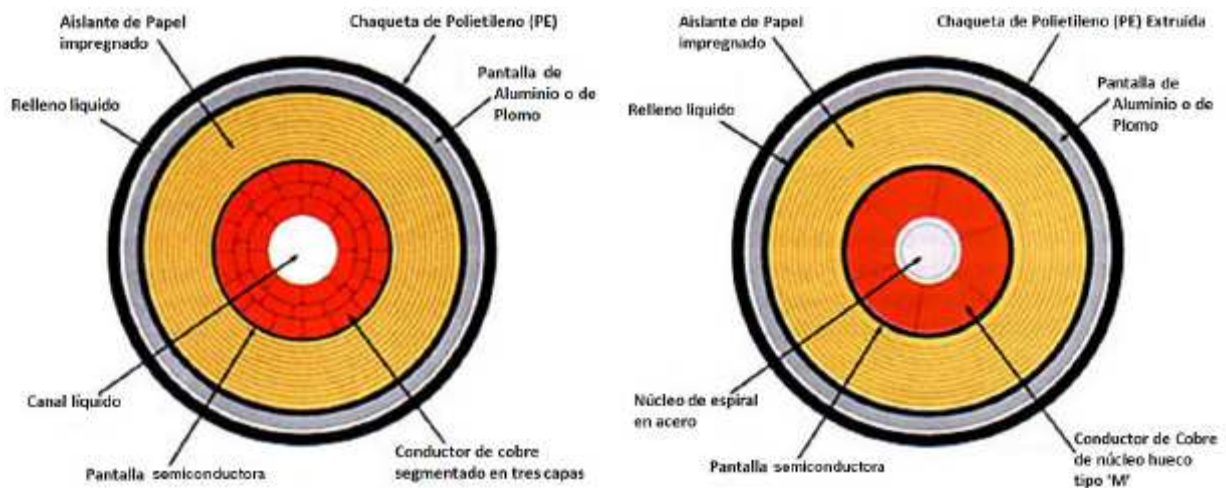


Figura 4. Cables con aislamiento de papel impregnado en aceite

1.1.3 Capas semiconductoras

Las capas semiconductoras juegan un papel crucial para garantizar un adecuado comportamiento del aislamiento. Se diferencian dos capas semiconductoras:

- Capa semiconductora interna, que se sitúa entre el conductor y el dieléctrico, sometida al mismo potencial que el conductor.
- Capa semiconductora externa, dispuesta entre el aislamiento y la pantalla metálica.

La función de estas capas es lograr que el campo eléctrico sea homogéneo y no se centre en puntos concretos asegurando el contacto total entre material conductor y aislamiento evitando la existencia de aire.

Las capas semiconductoras suelen estar fabricadas del mismo material que el aislamiento (para que compartan propiedades térmicas y mecánicas), combinadas con productos conductores para dotarlas de la conductividad requerida.

El proceso conocido como triple extrusión consiste en confeccionar al mismo tiempo aislante y capas semiconductoras para eliminar defectos e impurezas.

1.1.4 Pantalla

La pantalla es un elemento metálico que ejerce la función de la protección eléctrica del cable. Las misiones principales de la pantalla son dar forma cilíndrica al campo eléctrico que rodea al conductor y conducir las intensidades inducidas por éste y las intensidades homopolares (en caso de cortocircuito). Debido a la necesidad de despejar estas intensidades es precisa la conexión de las pantallas a tierra. A su vez, la pantalla ofrece un blindaje ante potenciales inducidos por campos eléctricos externos.

En ocasiones la pantalla está rodeada por capas cuya función es la protección contra la humedad.

Existen distintos tipos de pantallas metálicas, pudiéndose diferenciar en pantallas estancas, formadas por un tubo de plomo o láminas de aluminio corrugado, y pantallas no estancas formadas por alambres de cobre o aluminio o pletinas de cobre.

1.1 Componentes de los cables

1.1.4.1 Sistemas de puesta a tierra de las pantallas

Se consideran tres tipos de conexión de la pantalla a tierra:

- Conexión en ambos extremos (“both ends”): consiste en conectar ambos extremos de una sección eléctrica a tierra. Esto permite la circulación de corrientes entre puestas a tierra. Generalmente se utiliza esta conexión para tramos cortos de línea.

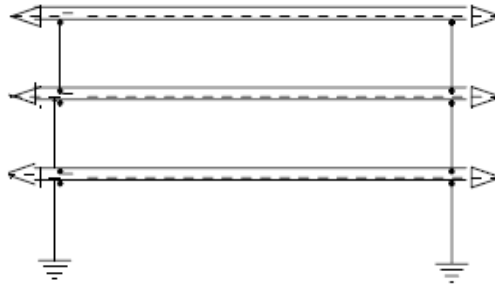


Figura 5. Conexión de pantallas Both ends

- Conexión en un extremo (“single point”): este tipo de conexión se diferencia por la conexión de la pantalla en un solo extremo. Las circulaciones de corrientes por la pantalla quedan anuladas, eliminando las pérdidas generadas por este motivo. A cambio, se genera una tensión inducida en la pantalla que limita la longitud de los tramos. Para conseguir mayor longitud de la línea, en ocasiones se conecta a tierra el punto central de ésta.

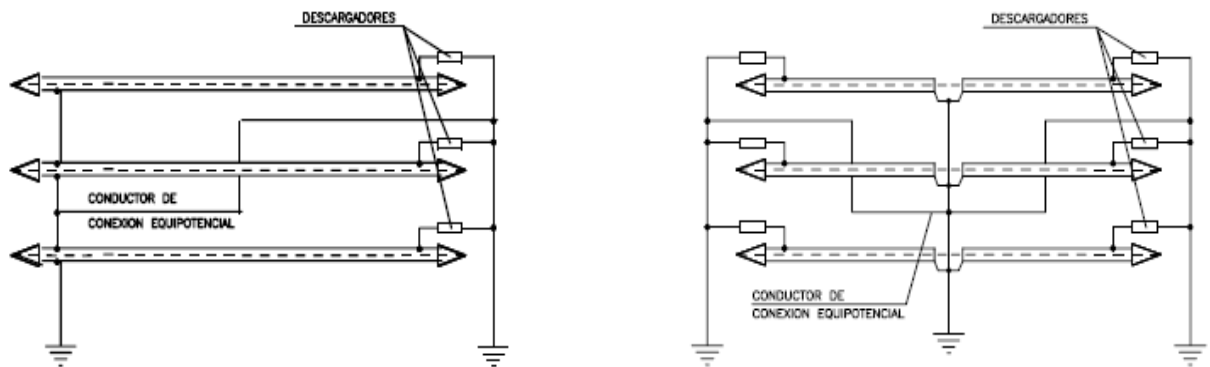


Figura 6. Conexión de pantallas Single point

- Cruzamiento de pantallas (“crossbonding”): Para este caso se efectúa una conexión en ambos extremos y se realiza un cruzamiento de las pantallas. Debido a este cruzamiento las corrientes de circulación se anulan en su mayoría permitiendo líneas de longitud considerable.

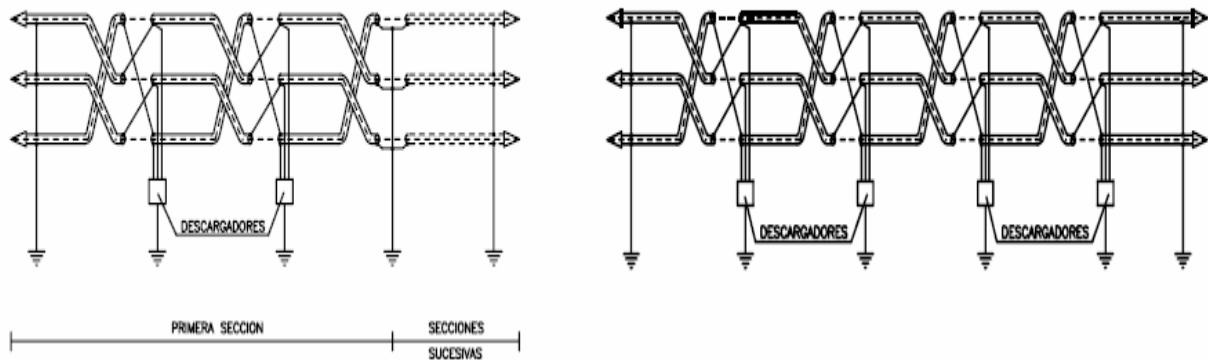


Figura 7. Conexión de pantallas Crossbonding

1.1.5 Armadura

Las armaduras son elementos metálicos que tienen como principal función proteger al cable contra esfuerzos de compresión o tracción excesivos. En general, no son muy comunes en cables subterráneos, solo se usan para casos en los que se prevean importantes esfuerzos mecánicos. Suele ser el elemento que diferencia estos cables de los submarinos, que están provistos de armadura ya que deben soportar mayores esfuerzos durante su instalación.

Las armaduras pueden encontrarse en forma de flejes, alambres, pletinas, tubos, etc.

Cuando se fabrica la armadura de un material magnético, como el acero, pueden generarse pérdidas magnéticas importantes por histéresis y corrientes de circulación en cables unipolares. Para reducir estas pérdidas es preferible usar materiales no magnéticos como el cobre y el aluminio.

Los cables con armadura normalmente tienen una capa no conductora situada entre la pantalla y la armadura conocida como acolchado de la armadura (armor bedding).

1.1.6 Cubierta exterior

Como su nombre indica, la cubierta exterior, es el elemento más externo del cable, situada sobre la pantalla o la armadura, si dispone de ésta.

La función de la cubierta es proteger al cable contra agentes externos dañinos para él como: químicos, biológicos, atmosféricos, abrasivos, etc. La cubierta exterior también cumple la función de aislar la pantalla metálica de tierra.

La mayor parte de las cubiertas de los cables subterráneos de potencia se fabrican de Polietileno (PE) o Policloruro de vinilo (PVC).

En cables armados es común utilizar un compuesto de yute o materiales fibrosos usados como una servidumbre para la armadura (armor serving).

1.2 Disposición del cable subterráneo

Los cables subterráneos pueden instalarse directamente bajo el terreno o en tubos recubiertos de hormigón.

1.2.1 Cables directamente enterrados

Este tipo de instalaciones consiste en abrir una zanja en el terreno en la que se entierran los cables. Estos suelen instalarse a una profundidad del orden de un metro. Los cables empleados en estas instalaciones deben estar preparados contra el ataque de agentes externos como la humedad.

Las instalaciones de cables enterrados son comunes en zonas donde haya posibilidad de reabrir la zanja para realizar mantenimientos del cable o incluir nuevos circuitos.

Las disposiciones más comunes para cables unipolares son en tresbolillo en contacto y en capa, ya sea en contacto o separados.

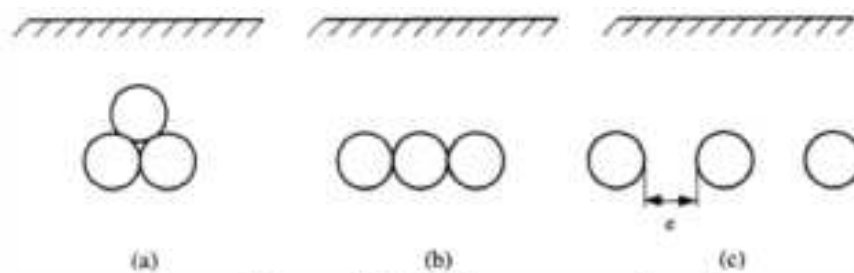


Figura 8. Varias instalaciones de cables directamente enterrados

En ocasiones los cables son enterrados en zanjas rellenadas con material térmico, empleado por sus buenas propiedades para disipar el calor.

1.2.2 Cables dispuestos en bancos de ductos

En estas instalaciones los cables se alojan en tubos, por lo general uniformemente separados. Los tubos o ductos, son de materiales poliméricos, como el PVC, o metálicos como el acero galvanizado. Mediante los ductos se consigue protección mecánica adicional y alargar la vida útil del cable al evitar el contacto directo con el terreno.

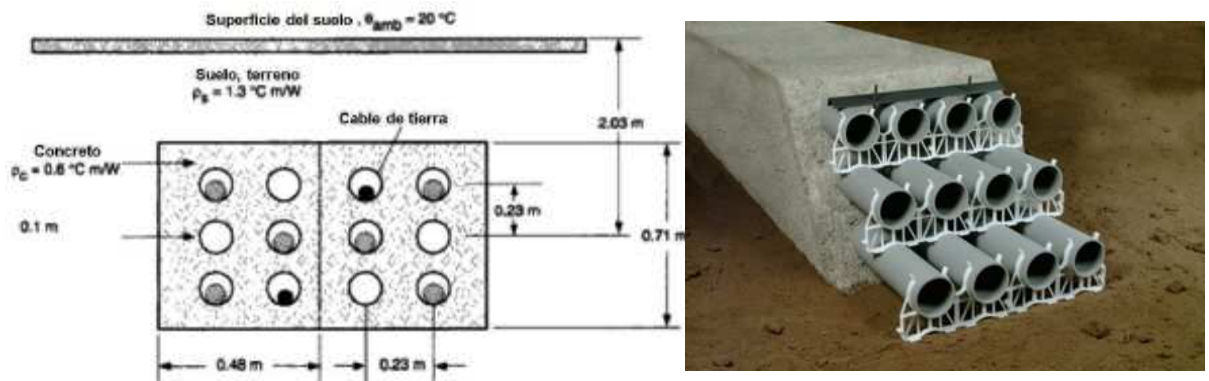


Figura 9. Bancos de ductos

Los bancos de ductos permiten una fácil instalación y mantenimiento de las líneas subterráneas. Este último punto junto con la posibilidad de instalar gran cantidad de cables hace que este tipo de instalaciones sean comunes en zonas urbanas.

Como contrapartida, los bancos de ductos tienen menor capacidad de disipación térmica que los cables directamente enterrados.

Capítulo 2

Cálculo de la intensidad admisible. Norma UNE 21144

2.1 Fundamentos teóricos

El método utilizado en la obtención de la intensidad de corriente máxima admisible en un cable, se basa en un modelo térmico-eléctrico de la estructura del cable y de la instalación de éste.

En el modelo del circuito térmico se representan las distintas capas del cable desde su eje longitudinal hasta la capa exterior, así como el ambiente exterior que le rodea.

La circulación de corriente a través del conductor genera un flujo de calor hacia el exterior debido a las pérdidas eléctricas y dieléctricas que se producen en conductor y aislante respectivamente. Esto produce incrementos de temperatura entre las distintas capas, que definen la intensidad máxima que puede circular por el cable sin que se deteriore el material aislante y el cable en general.

Los incrementos de temperatura producidos por las pérdidas eléctricas y dieléctricas deben ser iguales a la diferencia de temperatura entre el conductor y el ambiente.

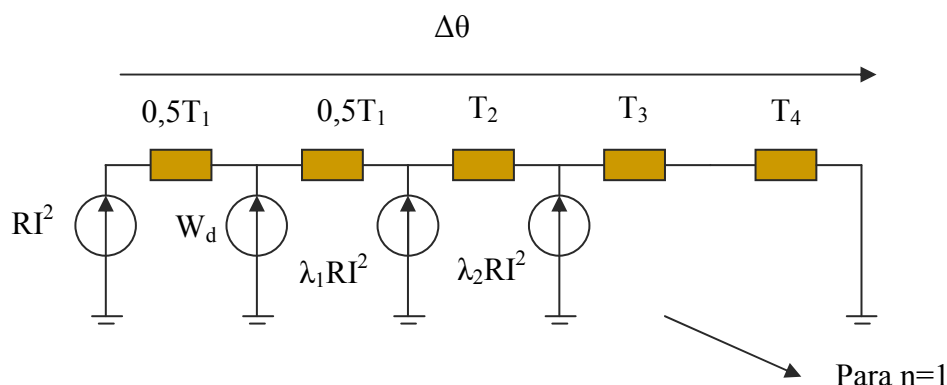


Figura 10. Modelo térmico-eléctrico de un cable

2.1.1 Resistencia térmica

El calor evacuado en cada una de las capas es proporcional a la diferencia de temperatura en ambos extremos y a la conductividad térmica del material.

La resistividad térmica de un material es una característica intrínseca del mismo y se puede definir como “el valor de la diferencia de temperatura, en grados °K, entre las dos caras opuestas de un cubo de un centímetro de arista, que permite el paso de un vatio de calor”

2.1.1.1 Resistencia térmica en el cable

La resistencia térmica de cada una de las capas del cable depende de las dimensiones (diámetro exterior y espesor) y de la conductividad térmica del material.

Las resistencias térmicas de los materiales conductores pueden despreciarse al tener una conductividad térmica alta.

2.1.1.2 Resistencia térmica externa

La resistencia térmica externa al cable depende de la instalación en la que éste se encuentre.

Para calcular la resistencia térmica de cables enterrados es necesario conocer la profundidad de la instalación y la disposición de los cables en el caso de que haya más de uno.

2.1.2 Pérdidas eléctricas

2.1 Fundamentos teóricos

2.1.2.1 Pérdidas por Efecto Joule en el Conductor

Las pérdidas por efecto Joule que se producen en un conductor por unidad de longitud dependen de la resistencia y de la corriente eficaz que transporta.

$$W_c = R \cdot I^2$$

Ecuación 1: Pérdidas por efecto Joule en el conductor

La resistencia eléctrica del conductor es la causa de la mayoría de las pérdidas en el cable. La resistencia aumenta con la longitud del cable, disminuye con la sección del conductor y es función de la resistividad del material:

$$R = \rho_T \cdot \frac{l}{s}$$

Ecuación 2: Resistencia eléctrica en un cable

El valor de esta resistencia, se considerará a la temperatura máxima de servicio, que es a la que circula la máxima intensidad por el conductor.

Cuando por el cable circula corriente alterna, se producen dos efectos que aumentan las pérdidas eléctricas al producirse un incremento aparente de la resistencia del conductor:

2.1.2.1.1 Efecto Pelicular

El Efecto Pelicular se debe a que la densidad de corriente no es uniforme en la sección transversal del conductor, hecho que se hace más pronunciado a medida que aumenta la frecuencia de la corriente alterna.

Las variaciones de flujo magnético provocan que la corriente no se distribuya de la misma forma en la sección transversal. En el interior del conductor se inducen tensiones mayores y menor densidad de corriente que en el exterior de éste. La densidad de corriente aumenta a medida que nos alejamos del centro del conductor debido a la oposición que hace la tensión inducida al cambio de la corriente que se produce.

El efecto Pelicular puede simplificarse como una reducción de la sección efectiva del cable, por la que circula corriente, aumentando la resistencia del conductor.

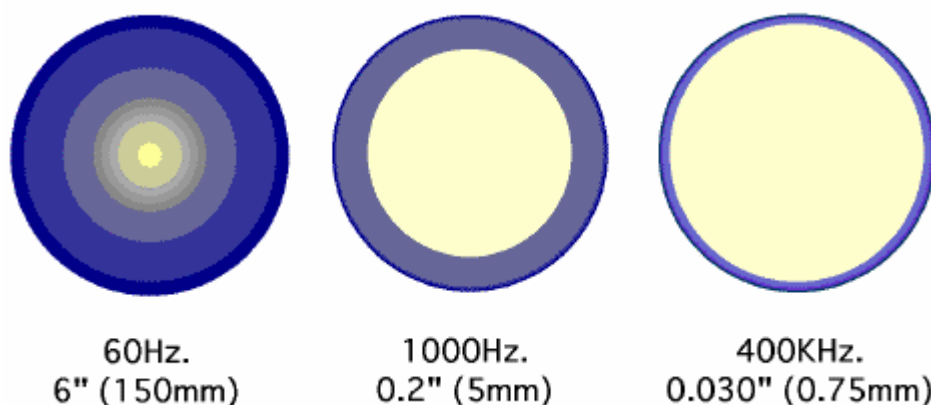


Figura 11. Efecto pelicular para diferentes frecuencias. La corriente se muestra en azul.

Con corriente continua no se presenta este efecto debido a la uniformidad de la densidad de corriente.

2.1.2.1.2 Efecto Proximidad

El Efecto Proximidad se produce cuando un conductor por el que circula corriente alterna tiene otro conductor cercano con el mismo tipo de corriente. Entre ambos conductores se generan efectos magnéticos que modifican la distribución de la densidad de corriente en la sección transversal del conductor, provocando que esta corriente no esté uniformemente repartida y por lo tanto la sección eficaz del conductor sea menor, y con ello la resistencia eléctrica.

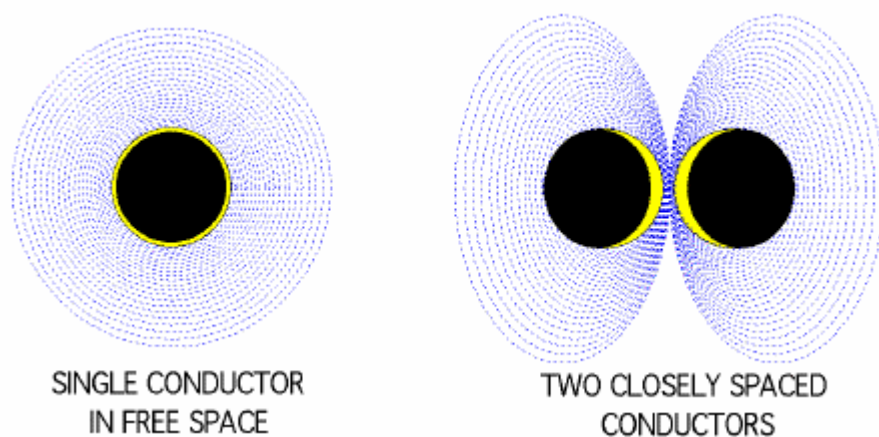


Figura 12. Efecto proximidad. Corriente en amarillo; campo magnético en azul.

Las configuraciones que provocan este efecto, suelen ser de dos tipos, o bien, cables formados por dos o más conductores (Bipolares, Tripolares, Multipolares) o un grupo de cables unipolares con una determinada configuración geométrica.

2.1 Fundamentos teóricos

2.1.2.2 Pérdidas en las pantallas

Las pérdidas generadas en la pantalla metálica de un cable pueden ser de tres tipos. El tipo de puesta a tierra de la pantalla es fundamental para que se produzcan un tipo de pérdidas u otro.

2.1.2.2.1 Pérdidas por corrientes de circulación

La corriente que circula por el conductor induce corrientes sobre la pantalla, estas son las conocidas como corrientes de circulación.

Estas corrientes solo se producen cuando la pantalla está conectada a tierra en ambos extremos de una sección eléctrica, al cerrarse una espiral que rodea una parte del campo magnético generado por la corriente principal del cable.

En instalaciones cuya pantalla está permutada (Crossbonding), las corrientes de circulación son despreciables siempre que las tres secciones que se producen entre los dos extremos conectados a tierra sean idénticas. Cuando existe un desequilibrio entre las secciones aparecen pérdidas por corrientes de circulación.

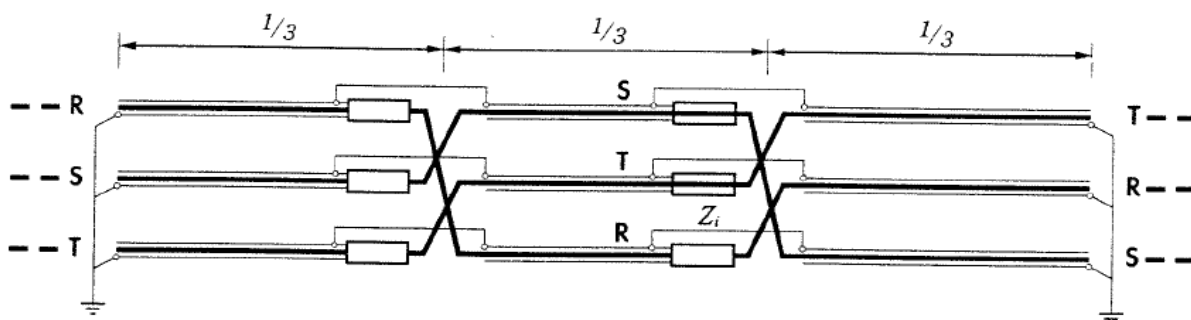


Figura 13. Conexión de pantallas permutada de secciones idénticas.

En instalaciones con pantalla conectada a tierra en un único extremo, las pérdidas por corrientes de circulación son nulas.

Las pérdidas por corrientes de circulación se expresan como una fracción de las pérdidas por efecto Joule en el conductor

2.1.2.2.2 Pérdidas por corrientes de Foucault

En los casos en que la pantalla está en cortocircuito en un solo punto o está permutada (Crossbonding), se generan unas pérdidas por corrientes inducidas sobre la pantalla.

Las pérdidas por corrientes de Foucault en las pantallas también se expresan como una fracción de las pérdidas por efecto Joule en el conductor.

2.1.2.2.3 Pérdidas por efecto proximidad

Debido al efecto proximidad comentado anteriormente, en las pantallas se generan unas corrientes transversales distintas a las corrientes de circulación. Estas corrientes suelen ser de un orden de magnitud inferior, por lo que es común despreciarlas.

2.1.3 Pérdidas dieléctricas

Las fugas de energía que se generan en el material aislante se conocen como pérdidas dieléctricas. Al aplicar una tensión sobre el cable se genera el campo eléctrico, el cual produce estas pérdidas, que se muestran por medio de un calentamiento del aislante.

Las pérdidas dieléctricas se producen principalmente en corriente alterna donde son fundamentales las características del material aislante, como la permitividad relativa o el factor de pérdidas.

Estas pérdidas deben tomarse en consideración principalmente en cables apantallados al establecerse un camino para la corriente por la diferencia de voltaje existente entre conductor y pantalla.

Las pérdidas dieléctricas pueden despreciarse en el caso de cables de corriente continua y en cables de corriente alterna donde la tensión aplicada no es muy elevada.

2.2 Norma UNE 21144

2.2.1 Introducción

La Norma UNE 21144 es una norma sobre cables eléctricos, destinada al cálculo de la intensidad admisible. Para evaluar la intensidad de corriente admisible se realizará un balance de flujo de energía generada y disipada por conducción de calor. El objetivo es que el incremento de temperatura entre el conductor y el ambiente no supere un cierto valor. Esto nos fijará la máxima corriente admisible en el cable.

2.2 Norma UNE 21144

Dicha norma está dividida en tres partes, además, cada parte se ha dividido en secciones que se publican como normas independientes. La estructura es la siguiente:

Parte 1: Ecuaciones de intensidad admisible y cálculo de pérdidas

- Sección 1: Generalidades
- Sección 2: Factores de pérdidas por corrientes de Foucault en las cubiertas en el caso de dos circuitos en capas

Parte 2: Resistencia térmica

- Sección 1: Cálculo de la resistencia térmica.
- Sección 2: Método de cálculo de los coeficientes de reducción de la intensidad admisible para grupos de cables al aire y protegidos de la radiación solar.

Parte 3: Secciones sobre condiciones de funcionamiento

- Sección 1: Condiciones de funcionamiento de referencia y selección del tipo de cable.

Esta norma fue publicada en Mayo de 1997, anulando y sustituyendo a las siguientes normas: UNE 21-144 (1990), UNE 21-144/1M (1992) y UNE 21-144/2M (1993). La Norma UNE 21144 es equivalente a la Norma Internacional IEC 60287.

La Norma ha sido elaborada por el comité técnico AEN/CTN 20-21 Electrotécnico cuya Secretaría desempeña AENOR.

Esta norma concierne exclusivamente al funcionamiento en régimen permanente de los cables aislados de todas las tensiones en corriente alterna y de tensiones hasta 5kV inclusive en corriente continua, enterrados directamente en el suelo, en conductos, canalizaciones o en tubos de acero así como los cables colocados al aire libre. Se entiende por “régimen permanente” la circulación continua de una intensidad de corriente constante (factor de carga 100%) justamente suficiente para alcanzar asintóticamente la temperatura máxima del conductor, suponiendo que las condiciones del medio ambiente permanezcan constantes.

Las fórmulas propuestas en la Norma son esencialmente literales y dejan la libre elección de determinados parámetros importantes. Estos últimos pueden dividirse en tres grupos:

- Parámetros ligados a la construcción del cable.
- Parámetros relacionados con las condiciones del medio circundante.
- Parámetros que resulten de un acuerdo entre el fabricante y el usuario.

2.2.2 Parte 1: Ecuaciones de intensidad admisible y cálculo de pérdidas

Esta parte contiene los métodos para el cálculo de la intensidad admisible en los cables a partir de los detalles del incremento de temperatura admisible, resistencia del conductor, pérdidas y resistividades térmicas.

Las fórmulas recomendadas en esta norma contienen parámetros que varían con la especificación del cable y los materiales utilizados.

La primera sección proporciona las ecuaciones para el cálculo de la intensidad admisible y las fórmulas de las pérdidas en el conductor, el aislamiento principal y las pérdidas en la pantalla o cubierta metálica y en la armadura o refuerzo.

La segunda sección de esta parte proporciona un método de cálculo de pérdidas por corrientes de Foucault en las cubiertas metálicas para el caso particular de cables unipolares dispuestos en capas en circuitos trifásicos dobles.

2.2.2.1 Sección 1: Generalidades

2.2.2.1.1 Generalidades

Como ya se indicó anteriormente, esta sección contiene los métodos para el cálculo de la intensidad admisible en los cables a partir de los detalles del incremento de temperatura admisible, resistencia del conductor, pérdidas y resistividades térmicas. Además, contiene las fórmulas relativas a R , W_d , λ_1 y λ_2 (posteriormente se describirán estos parámetros).

La Norma deduce la intensidad admisible en un cable a partir de la expresión que da el calentamiento del conductor por encima de la temperatura ambiente:

$$\Delta\theta = \left(I^2 R + \frac{1}{2} W_d\right) T_1 + \left[I^2 R(1 + \lambda_1) + W_d\right] n T_2 + \left[I^2 R(1 + \lambda_1 + \lambda_2) + W_d\right] n (T_3 + T_4)$$

Ecuación 3: Expresión del calentamiento en el conductor para cables de corriente alterna enterrados donde la desecación del suelo no existe o los cables están en el aire.

La ecuación de la intensidad admisible varía en función de que los cables transporten corriente alterna o continua, así como si están expuestos directamente a la radiación solar o enterrados.

La Norma distingue entre tres tipos de terrenos para cables enterrados:

- Cables enterrados donde la desecación del suelo no ocurre
- Cables enterrados donde se evita la desecación del terreno.
- Cables enterrados donde se produce desecación parcial del terreno.

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d [0,5 T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4)]}{R T_1 + n R (1 + \lambda_1) T_2 + n R (1 + \lambda_1 + \lambda_2) (T_3 + T_4)} \right]^{0,5}$$

Ecuación 4: Intensidad admisible para cables de corriente alterna enterrados donde la desecación del suelo no existe o los cables están en el aire.

2.2.2.1.2 Cálculo de pérdidas

En este apartado se dan las expresiones necesarias para calcular la resistencia del conductor en corriente alterna R , las pérdidas dieléctricas W_d , el factor de pérdidas en las cubiertas metálicas o en las pantallas λ_1 y el factor de pérdidas en las armaduras, los refuerzos y los tubos de acero λ_2 .

Resistencia del conductor en corriente alterna

La fórmula para calcular la resistencia del conductor, por unidad de longitud, en corriente alterna es la siguiente:

$$R = R' (1 + y_s + y_p)$$

Ecuación 5: Resistencia eléctrica del conductor en corriente alterna

La resistencia del conductor en corriente continua depende directamente de la temperatura máxima de servicio, del coeficiente de variación a 20°C y de la resistencia de conductor en corriente continua a 20°C.

$$R' = R_0 [1 + \alpha_{20}(\theta - 20)]$$

Ecuación 6: Resistencia eléctrica del conductor en corriente alterna a 20°C

La Norma especifica obtener R_0 de unos listados expuestos en la Norma UNE 21022. Esta última norma ha sido anulada por la Norma UNE-EN 60228.

El factor de efecto pelicular, y_s , depende de la frecuencia de la corriente de alimentación, así como de la resistencia del conductor en corriente continua y el tipo de conductor.

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0,8x_s^4} \quad \text{con} \quad x_s^2 = \frac{8\pi f}{R'} 10^{-7} k_s$$

Ecuación 7: Factor de efecto pelicular

El factor de efecto proximidad, y_p , tiene una expresión diferente dependiendo de si el cable es bipolar (o dos cables unipolares), si es tripolar (o tres cables unipolares) o si son cables en tubo de acero. Para el primero de los casos, por ejemplo, la expresión sería la siguiente:

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0,8x_p^4} \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 \cdot 2,9 \quad \text{con} \quad x_p^2 = \frac{8\pi f}{R'} 10^{-7} k_p$$

Ecuación 8: Factor de efecto proximidad

Pérdidas dieléctricas

Las pérdidas dieléctricas dependen de la tensión y, por tanto, sólo llegan a ser importantes para ciertos niveles de ésta en el material aislante. Deberán tenerse en cuenta a partir de ciertos valores de tensión, indicados en la Norma, respecto al material aislante correspondiente. No es necesario calcularla para cables multipolares no apantallados y cables de corriente continua.

$$W_d = \omega C U_0^2 \operatorname{tg}(\delta)$$

Ecuación 9: Pérdidas dieléctricas

Factor de pérdidas en las cubiertas metálicas o en las pantallas

$$\lambda_1 = \lambda'_1 + \lambda''_1$$

Ecuación 10: Relación de pérdidas totales en la pantalla respecto a las pérdidas totales en el conductor

Las pérdidas en las cubiertas metálicas o en las pantallas, λ_1 , son debidas a las corrientes de circulación, λ'_1 , y a las corrientes de Foucault, λ''_1 .

Las fórmulas indicadas en esta sección expresan estas pérdidas en relación a las pérdidas totales de energía en el/los conductor/es y en cada caso particular se indica cual es el tipo de pérdida a considerar. Las fórmulas para los cables unipolares se aplican solamente a circuitos independientes y se desprecian los efectos de retorno por tierra. Tanto para cubiertas metálicas lisas como onduladas se señalan los métodos de cálculo correspondientes.

Para los cables unipolares con cubiertas metálicas en cortocircuito en ambas extremidades de una sección eléctrica longitudinal (Both End), solamente es preciso considerar las pérdidas debidas a las corrientes de circulación en las cubiertas metálicas.

Para las instalaciones donde la pantalla está conectada en un solo punto (Single point) o permutadas (Crossbonding), las pérdidas en la pantalla vendrán determinadas por las corrientes de Foucault, despreciando las corrientes de circulación salvo para pantallas metálicas permutadas que contenga secciones con desequilibrios notables.

Dependiendo del número de cables unipolares y la disposición de los mismos (en caso de ser 3 unipolares), se tendrá una expresión diferente para el cálculo de λ_1 . En los casos en que las cubiertas metálicas estén en cortocircuito en ambas extremidades de una sección eléctrica, el parámetro λ''_1 será 0. Por ejemplo, para tres cables unipolares dispuestos en capa con transposición regular, con las cubiertas metálicas en cortocircuito en ambas extremidades de una sección eléctrica:

$$\lambda'_1 = \frac{R_s}{R} \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X_1} \right)^2}$$

Ecuación 11: Relación de pérdidas en la pantalla respecto a las pérdidas totales en el conductor para tres cables con pantallas en cortocircuito en ambas extremidades.

Además de todos estos parámetros, el factor de pérdidas en las pantallas también depende de la variación de la separación de los cables unipolares entre los puntos en que se ponen en cortocircuito las cubiertas metálicas, y para conductores de gran sección de

construcción segmentada. Este efecto se compensa multiplicando por el correspondiente parámetro las ecuaciones anteriores.

Factor de pérdidas en las armaduras, los refuerzos y los tubos de acero

El factor de pérdidas en las armaduras, refuerzos y los tubos de acero, está representado mediante λ_2 , una fracción de la potencia disipada en la armadura metálica, el refuerzo o el tubo de acero entre la potencia perdida en todos los conductores.

En el caso de armaduras o refuerzos no magnético, el procedimiento general es el de combinar el cálculo de las pérdidas en el refuerzo con el de las pérdidas en la cubierta metálica. El valor de la resistencia del refuerzo depende del paso de las cintas o flejes.

Para armaduras o refuerzos magnéticos, se tendrá una expresión diferente en función de si es un cable unipolar (sólo para algún caso concreto), bipolar o tripolar. Por ejemplo, para cables bipolares con armadura de alambres de acero:

$$\lambda_2 = \frac{0,62\omega^2 10^{-14}}{R \cdot R_A} + \frac{3,82 A \omega 10^{-5}}{R} \left[\frac{1,48 r_1 + t}{d_A^2 + 95,7 A} \right]^2$$

Ecuación 12: Relación de pérdidas totales en la armadura respecto a las pérdidas totales en el conductor para cables bipolares con armadura de alambres de acero

2.2.2.2 Sección 2: Factores de pérdidas por corrientes de Foucault en las cubiertas en el caso de dos circuitos en capas

2.2.2.2.1 Descripción del método

El método es utilizado de forma similar al que se utiliza para los circuitos únicos de la sección 1. Allí las fórmulas propuestas para los factores de pérdidas aplicables a unas cubiertas de resistencia longitudinal tal que m es inferior a 0,1 (Resistencia de la cubierta metálica, $R_s = 3,14 \mu\Omega/\text{m}$ a 50 Hz) se dan con unas fórmulas empíricas que permiten calcular los coeficientes de corrección para las cubiertas de resistencia más bajos.

No obstante, en el caso de un circuito doble, estas fórmulas empíricas precisas que cubren la gama completa de los coeficientes, necesitarían contener tantos términos que presentarían poca o ninguna ventaja con relación a los coeficientes precisos dados en forma de tablas, con posibilidad de interpolación. Esta última solución ofrece la ventaja de que la precisión de los factores de pérdidas pueda ser sensiblemente igual a la de los cálculos de origen y es superior al 1%.

Grandes líneas generales del método

El factor de pérdidas en la cubierta de un cable dado, en un circuito doble colocado en capas se evalúa como sigue:

$$\lambda''_{1d} = \frac{R_s}{R} [\lambda_0 \cdot H(1a3) \cdot N(1a6) \cdot J(1a6) \cdot g_s + G_s]$$

Ecuación 13: factor de pérdidas de la cubierta para un ambiente de baja resistencia, en un circuito doble.

Donde:

- *H (1 a 3) son los coeficientes de corrección de la resistencia de la cubierta refiriéndose a los cables 1, 2 ó 3 en un circuito único.*
- *N (1 a 6) son los coeficientes que introducen las influencias mutuas entre los circuitos y son de hecho dependientes de orden de sucesión de fases en los cables 1 a 3 y 4 a 6.*
- *J (1 a 6) son los coeficientes que dependen de la posición de los cables 1 a 3 y 4 a 6 en cada circuito.*

La misión de los coeficientes *N* y *J* no están directamente relacionados con una función física pero se han elegido para simplificar y ponerlos en forma de tablas.

2.2.3 Parte 2: Resistencia térmica

Esta parte contiene los métodos para el cálculo de la resistencia térmica interna de los cables y la externa para los cables instalados al aire, enterrados o en conductos. La primera sección proporciona las fórmulas necesarias para ejecutar los cálculos mencionados. También incluye los cálculos numéricos de las magnitudes dadas en forma de gráficos.

La segunda sección proporciona un método y datos para calcular los coeficientes de reducción de la intensidad admisible a aplicar a grupos de cables instalados en tendido horizontal en el aire.

2.2.3.1 Sección 1: Cálculo de la resistencia térmica

Como se ha comentado anteriormente en esta sección se procederá al cálculo de las resistencias térmicas T_1 , T_2 , T_3 y T_4 necesarias para el cálculo de la intensidad admisible en el cable según las fórmulas dadas en la sección 1 de la parte 1.

Resistencia térmica entre un conductor y la envolvente, T_1

En este apartado se facilitan las fórmulas necesarias para el cálculo de la resistencia térmica del aislamiento del cable T_1 .

La Norma diferencia entre cables unipolares, bipolares o tripolares. Además distingue varias formas de conductores (excepto para cables unipolares), si los cables están apantallados o para el caso de cables de aceite fluido.

Se deberá recurrir a una fórmula u otra para el cálculo de este parámetro, ya que el factor geométrico es diferente para cada caso. Por ejemplo, para cables unipolares la resistencia térmica entre un conductor y la envolvente está dada por:

$$T_1 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \left[1 + \frac{2t_1}{d_c} \right]$$

Ecuación 14: Resistencia térmica entre conductor y envolvente para cables unipolares

Resistencia térmica entre la cubierta y la armadura, T_2

Para el cálculo de la resistividad térmica entre la cubierta y la armadura, T_2 , se ofrecen dos alternativas de cálculo, cada una con una fórmula distinta. Una opción es para cables tres plomos con cubierta de aluminio para cada fase y la más general es para cables unipolares, bipolares o tripolares que tengan una cubierta metálica común. Para esta última la fórmula es la siguiente:

$$T_2 = \frac{1}{2\pi} \rho_T \ln \left[1 + \frac{2t_2}{D_s} \right]$$

Ecuación 15: Resistencia térmica entre cubierta y armadura para cables unipolares, bipolares o tripolares con cubierta metálica en común

Resistencia térmica del revestimiento o cubierta exterior, T_3

Las cubiertas exteriores se disponen generalmente en capas concéntricas. A través de la siguiente expresión obtenemos la resistencia térmica de la cubierta exterior T_3 :

$$T_3 = \frac{1}{2\pi} \rho_T \ln \left[1 + \frac{2t_3}{D_a'} \right]$$

Ecuación 16: Resistencia térmica del revestimiento o cubierta exterior

En cables no armados D_a' es el diámetro exterior del componente inmediatamente por debajo.

Resistencia térmica externa, T_4

La resistencia térmica externa, T_4 , depende del tipo de instalación que tenga el cable, ya sea para cables instalados al aire libre o enterrados.

Para cables instalados al aire libre la Norma diferencia entre cables protegidos de la radiación solar y directamente expuesto a ella.

Para calcular la resistividad térmica externa de un cable enterrado, es necesario conocer varios parámetros del tipo de instalación, ya que afectan directamente al resultado. Estos parámetros son principalmente: número de cables en la instalación, disposición de estos y carga de cada uno, profundidad de la instalación y separación entre cables. La Norma ofrece distintas fórmulas dependiendo de estos parámetros. También se contempla la posibilidad de cables en canalizaciones enterradas, en conductos o tubos.

$$T_4 = \frac{1,5}{\pi} \rho_T [\ln(2u) - 0,630] \quad \text{donde } u = \frac{2L}{D_e}$$

Ecuación 17: Resistencia térmica externa para cables con cubierta metálica

2.2.3.2 Sección 2: Método de cálculo de los coeficientes de reducción de la intensidad admisible para grupos de cables al aire y protegidos de la radiación solar

Como se ha mencionado anteriormente, esta sección proporciona un método y datos para calcular los coeficientes de reducción de la intensidad admisible a aplicar a todos los tipos de cables dispuestos en grupos de cables instalados en tendido horizontal en el aire, siempre que los cables sean del mismo diámetro y tengan las mismas pérdidas. Se desprecian las pérdidas en el dieléctrico.

Esta norma facilita la información sobre la reducción de la intensidad admisible cuando los cables se instalan agrupados sólo en los siguientes casos:

- Un máximo de nueve cables dispuestos en forma de cuadrícula:

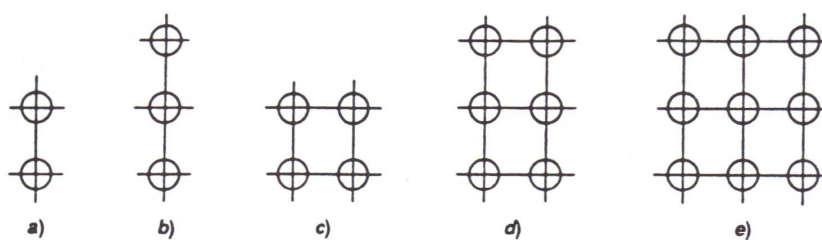


Figura 14. Cables unipolares al aire dispuestos en forma de cuadrícula

- Un máximo de seis circuitos formados cada uno por una terna de cables en tresbolillo, con hasta tres circuitos en capa horizontal o dos circuitos en posición vertical:

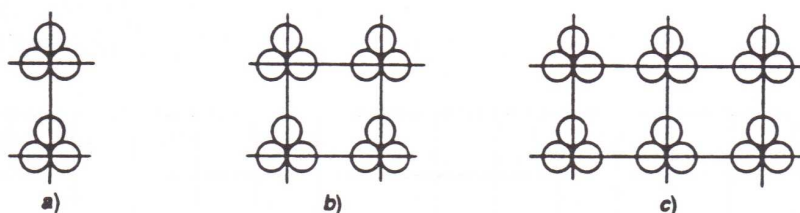


Figura 15. Cables en tresbolillo al aire en forma de cuadrícula

El método de cálculo es el siguiente:

Cuando la corriente admisible para un cable o un circuito considerado independientemente sea conocida y se desee calcular el coeficiente de reducción para un grupo de cables, se efectúa el cálculo para el cable más caliente.

Cuando no se dispone de valores de intensidad admisible calculadas con anterioridad, la intensidad admisible del cable más caliente de un grupo se calculará empleando las fórmulas dadas en la Parte 2, sección 1 para cables al aire, pero sustituyendo el coeficiente de disipación calorífico h dado en la sección 1, por otro h_g , calculado en esta sección.

En esta sección se incluyen también tablas para obtener los valores de separación mínimas entre las superficies exteriores de cables próximos, necesarias para evitar una reducción de la intensidad admisible de un cable o circuito.

2.2.4 Parte 3: Secciones sobre condiciones de funcionamiento

Esta parte de la Norma, contiene las temperaturas ambiente de referencia y resistividades térmicas del terreno en diversos países tales como Australia, Alemania, Canadá, Francia, etc. Con el fin de utilizar las fórmulas que se dan en las diversas secciones de la Norma, los valores numéricos de las magnitudes físicas deberían elegirse en relación con las condiciones de funcionamiento. En particular, las magnitudes relativas a las condiciones de funcionamiento de los cables son susceptibles de variar considerablemente de un país a otro.

En esta parte, también se indican las pautas generales de información necesaria para el usuario para la selección del tipo de cable apropiado. Las informaciones necesarias que facilitan la elección del tipo de cable apropiado, se han extraído de la Norma UNE 20435 y se dan en este capítulo de modo que los compradores puedan suministrar los datos técnicos que el fabricante de cables necesita cuando se solicita que especifique las dimensiones y el tipo correcto de cable para una aplicación determinada.

Capítulo 3

Diseño de la aplicación

El diseño de esta aplicación trata de facilitar los cálculos de la intensidad admisible en el caso de tres cables unipolares enterrados directamente sobre el suelo. Los cálculos empleados en la aplicación informática desarrollada se han obtenido de la Norma UNE 21144, concretamente de la primera sección de la Parte 1 y la primera sección de la Parte 2.

En este capítulo incluye un manual de usuario y se muestran las pautas seguidas por la aplicación para realizar el cálculo de la intensidad admisible.

3.1 Manual de Usuario

Como se ha indicado anteriormente la aplicación informática diseñada, ha sido creada bajo el entorno de programación Microsoft Visual Basic 2008 Express Edition, tratando de realizar un interfaz visual e intuitivo para el usuario.

La aplicación informática se inicia abriendo el archivo ejecutable “Cálculo de la Intensidad Admisible.exe”, del cual podemos ver una imagen a continuación:



Figura 16. Archivo ejecutable de la aplicación

Este archivo es compatible con los siguientes Sistemas operativos:

- Windows Server 2003
- Windows Vista
- Windows XP

La aplicación ha sido diseñada de modo que es necesario que el usuario complete todos los campos habilitados en la aplicación para así poder realizar el cálculo de la intensidad admisible según la Norma UNE 21144.

Al iniciar la aplicación, aparece una ventana de inicio (splash screen) la cual nos introduce en el ámbito de la aplicación.

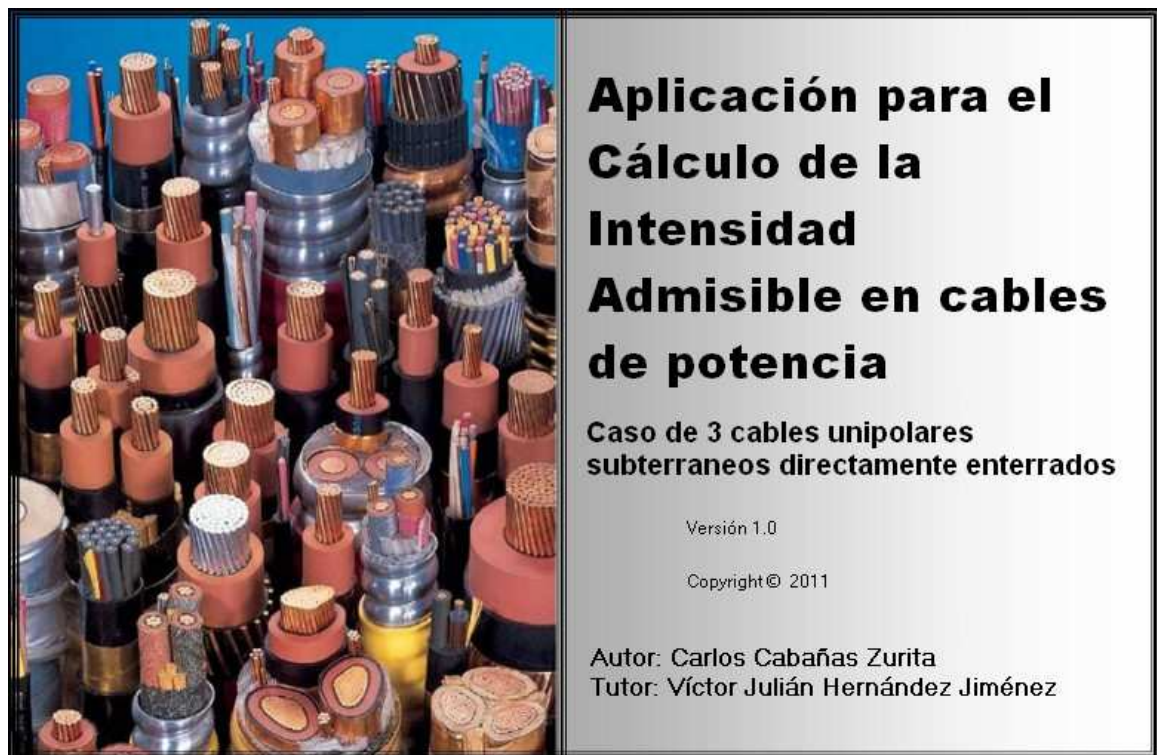


Figura 17. Ventana inicial de la aplicación

3.1 Manual de Usuario

Esta pantalla permanecerá unos segundos mientras se carga la aplicación. Una vez cargada se accederá al interfaz de ésta, el cual comienza con la Ventana principal.

3.1.1 Ventana principal

En esta ventana se podrán introducir y modificar todas las selecciones de materiales, configuraciones y parámetros mostrados en la aplicación.

En la Ventana principal, pueden realizarse cinco acciones, cada una de ellas tiene asignado un botón:

- Calcular intensidad admisible: al hacer “click” sobre este botón, se desplegará la ventana de resultados. Este botón sólo puede pulsarse una vez se hayan completado todos los parámetros y elecciones a las que da opción la aplicación, de lo contrario aparecerá un mensaje con el siguiente texto “Rellenar todos los campos”.
- Librería de cables e instalaciones: mediante este botón se abre la ventana del mismo nombre que el botón, donde podrán seleccionarse cuatro cables y doce tipos de instalación distintos.
- Aspectos técnicos del cálculo: en esta ventana se expondrán el alcance de la aplicación y la sistemática de los cálculos. Esta ventana muestra la misma información que el apartado 3.2 de esta memoria.
- Borrar datos: se eliminan todos los campos introducidos por el usuario.
- Salir: la aplicación se cierra. No se guardan los datos introducidos.

La ventana principal está dividida en dos pestañas (la primera de ellas está subdividida en más pestañas) en las que pueden introducirse los datos del cable y la instalación. Esta división es de la siguiente forma:

- Selección de materiales y dimensionamiento del cable
 - Conductor
 - Aislante
 - Pantalla
 - Cubierta exterior
- Instalación del cable y parámetros del terreno

En la introducción de datos es importante no usar el símbolo punto “.” como separador decimal, ya que la aplicación lo interpreta como separador de miles. Debe usarse la coma “,” para poner decimales.

A continuación se describirá y explicará cada una de las pestañas, las funciones y datos que alberga.

3.1.1.1 Pestaña: Selección de materiales y dimensionamiento del cable

En esta pestaña se podrán seleccionar los materiales de los componentes del cable, así como diámetros y espesores de éstos.

Cada uno de los componentes del cable tiene asignada una subpestaña dentro de la pestaña Selección de materiales y dimensionamiento del cable. En cada una de las subpestañas puede verse en un cuadro de texto en la zona inferior con una breve descripción de los parámetros a introducir y un esquema del cable en la zona derecha en el que se indica el espesor y diámetros del componente respectivo.

3.1.1.1.1 Subpestaña: Conductor

La aplicación da opción a elegir entre dos materiales para el conductor: Cobre o Aluminio. El conductor solo puede ser de sección circular, ofreciendo tres tipos distintos de ésta: Cableado, compacto y segmentado.

En esta pestaña hay que introducir tres parámetros:

- U_0 : Tensión fase-tierra del cable, es decir, tensión entre conductor y pantalla, en kV.
- Sección: Sección efectiva del conductor, en mm^2 .
- d_c : diámetro exterior del conductor, en mm

Cálculo Intensidad Admisible

Selección de materiales y dimensionamiento del cable | Instalación del cable y parámetros del terreno

Conductor | Aislante | Pantalla | Cubierta exterior

Material:

- ☒ Cobre
- ☐ Aluminio

Tipo de sección circular:

- ☐ Cableado
- ☒ Compacto
- ☐ Segmentado

U_0 : 18 [kV]

Sección: 400 [mm^2]

d_c : 23,1 [mm]

Simbología:

d_c : diámetro exterior del conductor [mm]
Sección: sección efectiva del conductor [mm^2]

Aspectos técnicos del cálculo | Librería de cables e instalaciones | **Calcular Intensidad admisible** | Borrar datos | Salir

Figura 18. Subpestaña: Conductor

3.1.1.1.2 Subpestaña: Aislante

Esta pestaña da opción a elegir un aislante polimérico de entre los siguientes: EPR, PVC, PE (HD y LD) y XLPE.

Además hay que introducir tres parámetros:

- D_i : diámetro sobre el aislamiento, en mm.
- t_1 : espesor del aislamiento entre conductor y pantalla, en mm.
- θ : temperatura máxima de servicio del conductor, en °C. Esta temperatura es concretada por el material aislante empleado.

Cálculo Intensidad Admisible

Selección de materiales y dimensionamiento del cable | Instalación del cable y parámetros del terreno

Conductor | **Aislante** | Pantalla | Cubierta exterior

Material:

- ☒ EPR
- ☐ PVC
- ☐ PE (HD y LD)
- ☐ XLPE

D_i : 36,9 [mm]

t_1 : 6,9 [mm]

θ : 105 [°C]

Simbología:

D_i : diámetro sobre el aislamiento [mm]
 t_1 : espesor del aislamiento entre conductor y envolvente [mm]

Aspectos técnicos del cálculo | Librería de cables e instalaciones | **Calcular Intensidad admisible** | Borrar datos | Salir

Figura 19. Subpestaña: Aislante

3.1.1.1.3 Subpestaña: Pantalla

Esta pestaña permite la selección del material de la pantalla metálica entre tres opciones: cobre, aluminio y plomo y sus aleaciones.

Los datos dimensionales a introducir referentes a la pantalla metálica son:

- Sección: Sección efectiva de la pantalla metálica, en mm^2
- D_s : diámetro exterior de la pantalla metálica, en mm.
- d : diámetro medio de la pantalla metálica, en mm.
- t_s : espesor de la pantalla metálica, en mm.

Cálculo Intensidad Admisible

Selección de materiales y dimensionamiento del cable Instalación del cable y parámetros del terreno

Conductor Aislante **Pantalla** Cubierta exterior

Material de la pantalla

☒ Cobre
☐ Aluminio
☐ Plomo y aleaciones de plomo

Sección: 16 [mm²]
D_s: 38,9 [mm]
d: 37,9 [mm]
t_s: 1 [mm]

Simbología:
Sección: sección efectiva de la cubierta metálica [mm²]
D_s: diámetro exterior de la cubierta metálica [mm]

Aspectos técnicos del cálculo Librería de cables e instalaciones **Calcular Intensidad admisible** Borrar datos Salir

Figura 20. Subpestaña: Pantalla

3.1.1.1.4 Subpestaña: Cubierta exterior

Esta es la última división dentro de la pestaña “Selección de materiales y dimensionamiento del cable” que hace referencia a la cubierta exterior del cable. Puede elegirse uno de los tres material disponibles: PE, PVC, Policloropreno. Además se introducen los parámetros dimensionales de la cubierta exterior:

- D_e : diámetro exterior del cable, en mm.
- t_3 : espesor del revestimiento externo, en mm.

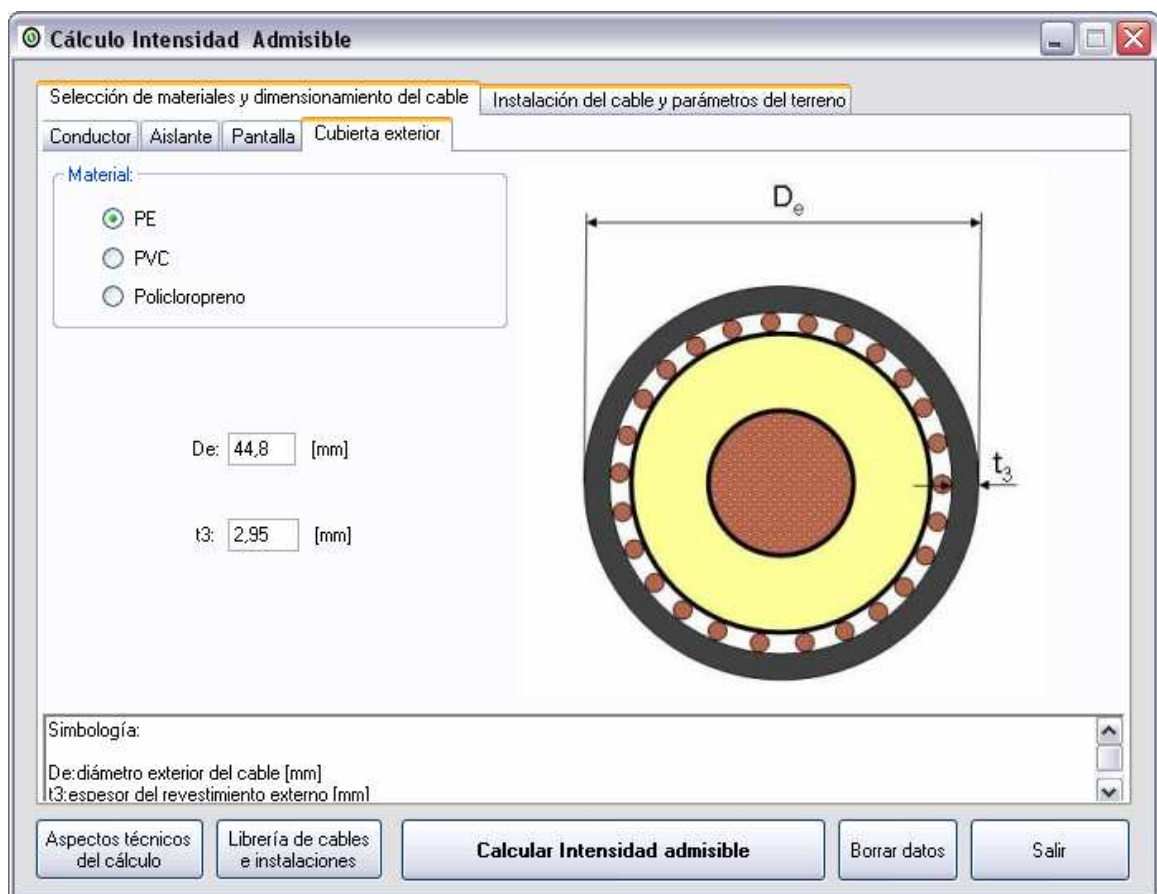


Figura 21. Subpestaña: Cubierta exterior

3.1.1.2 Pestaña: Instalación del cable y parámetros del terreno

En esta pestaña se definen los parámetros de la instalación y el terreno necesarios para el cálculo de la capacidad de transporte: disposición de los cables, separación entre ellos, conexión de la pantalla, etc.

La disposición de los cables puede ser en tresbolillo o en capa.

Se debe especificar si los cables están en contacto o separados, en cuyo caso debe introducirse la separación entre ejes de los cables, s .

La aplicación contempla los tres tipos de conexión a tierra de las pantallas metálicas, debiendo seleccionar una de ellas. Los tres tipos de conexión son:

- Both ends: Pantalla metálica conectada a tierra en ambos extremos.
- Single point: pantalla metálica conectada a tierra en un solo punto.
- Crossbonding: pantalla metálica entrecruzadas conectada a tierra en ambos extremos.

Adicionalmente deben introducirse los siguientes parámetros:

- θ_a : temperatura ambiente, en °C.
- Resistividad térmica del terreno, en K·m/W.
- L: profundidad de tendido, en mm. La medida se toma desde el eje del cable para la formación en capa o desde el centro de la formación en tresbolillo.

En la imagen de esta pestaña puede observarse gráficamente la profundidad de tendido y la separación entre cables para su disposición en capa o en tresbolillo.

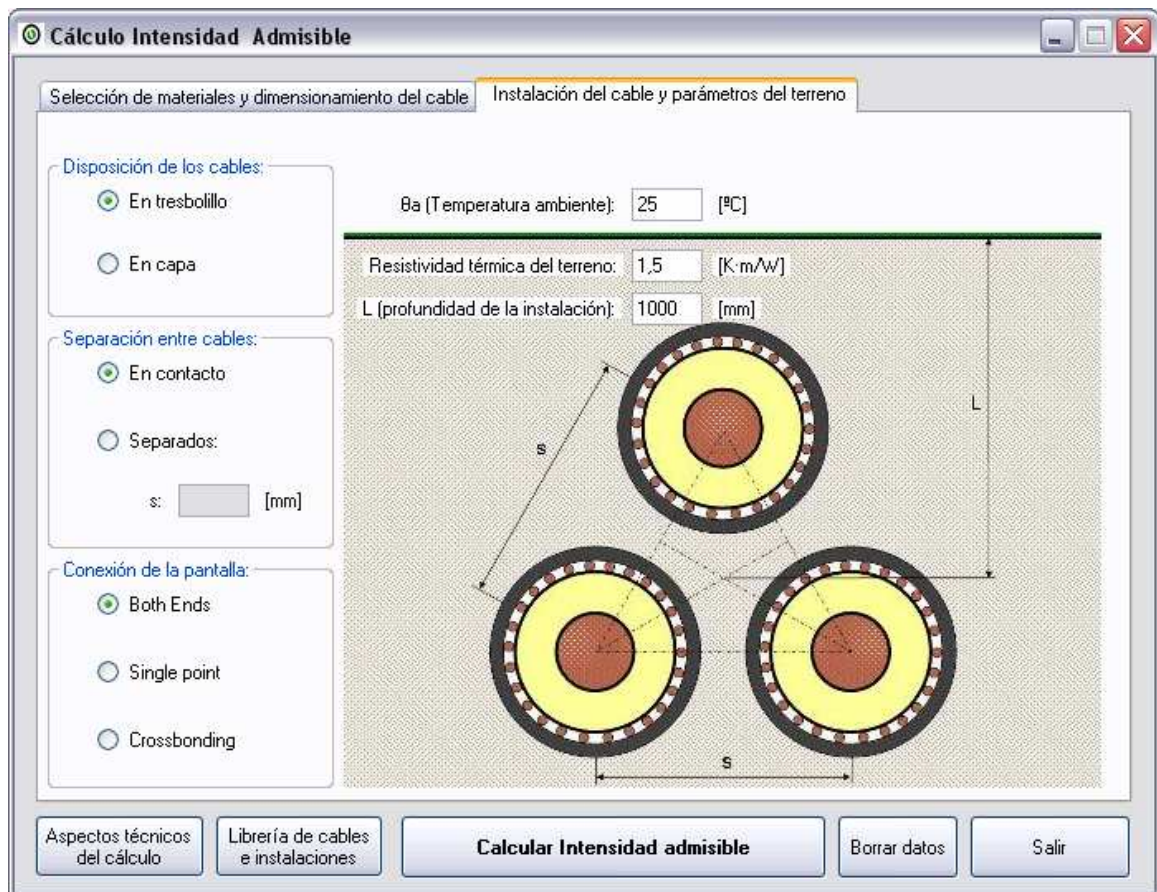


Figura 22. Pestaña: Instalación del cable y parámetros del terreno

3.1.2 Ventana Librería de cables e instalaciones

En esta ventana disponemos de dos listas desplegables y dos botones.

La primera lista desplegable alberga las especificaciones de materiales, configuraciones y dimensiones de cuatro cables obtenidos del catalogo “Cables y accesorios para Media Tensión” de 2009 del Grupo Prysmian. Los cables a elegir son:

- CU EPROTENAX-H COMPACT 18/30 kV S=400 mm²
- AL EPROTENAX-H COMPACT 18/30 kV S=400 mm²
- CU EPROTENAX-H COMPACT 18/30 kV S=500 mm²
- AL EPROTENAX-H COMPACT 18/30 kV S=500 mm²

La segunda lista desplegable permite seleccionar doce tipos de instalación predefinidas. Cuando se escoge una instalación con cables separados, la distancia entre ejes de los cables, s será establecida como 100 mm.

3.1 Manual de Usuario

Al pulsar el botón “Cargar valores” se alimentarán sobre la aplicación informática los valores preestablecidos de la selección de cada lista desplegable. Una vez cargados los valores pueden modificarse cada uno de ellos en la ventana principal.

El botón “Cerrar” cierra esta ventana.

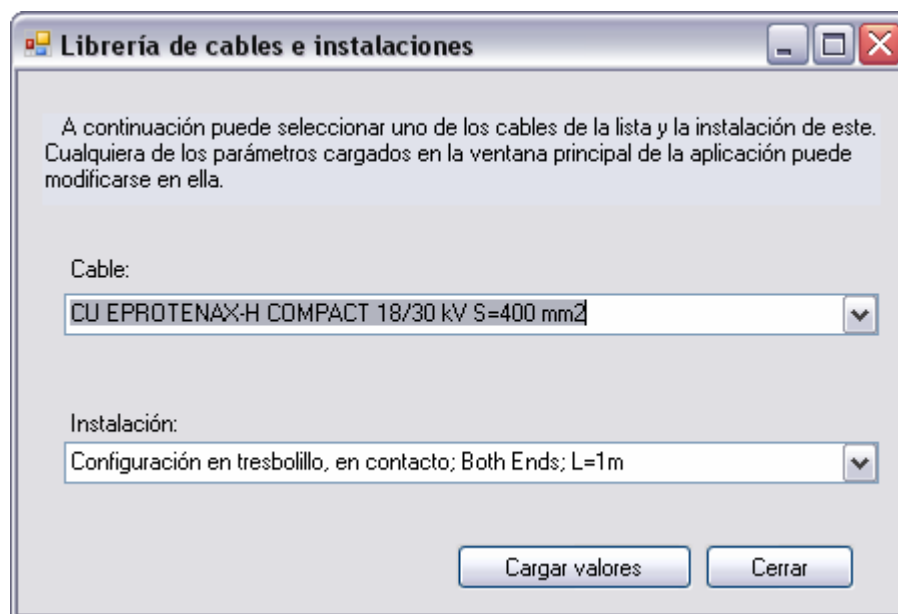


Figura 23. Ventana: Librería de cables e instalaciones

3.1.3 Ventana Aspectos técnicos del cálculo

En esta ventana se expone el alcance de la aplicación y la sistemática de los cálculos, mostrándose la misma información que el apartado 3.23.2 de esta memoria.

El botón “Cerrar” cierra esta ventana.

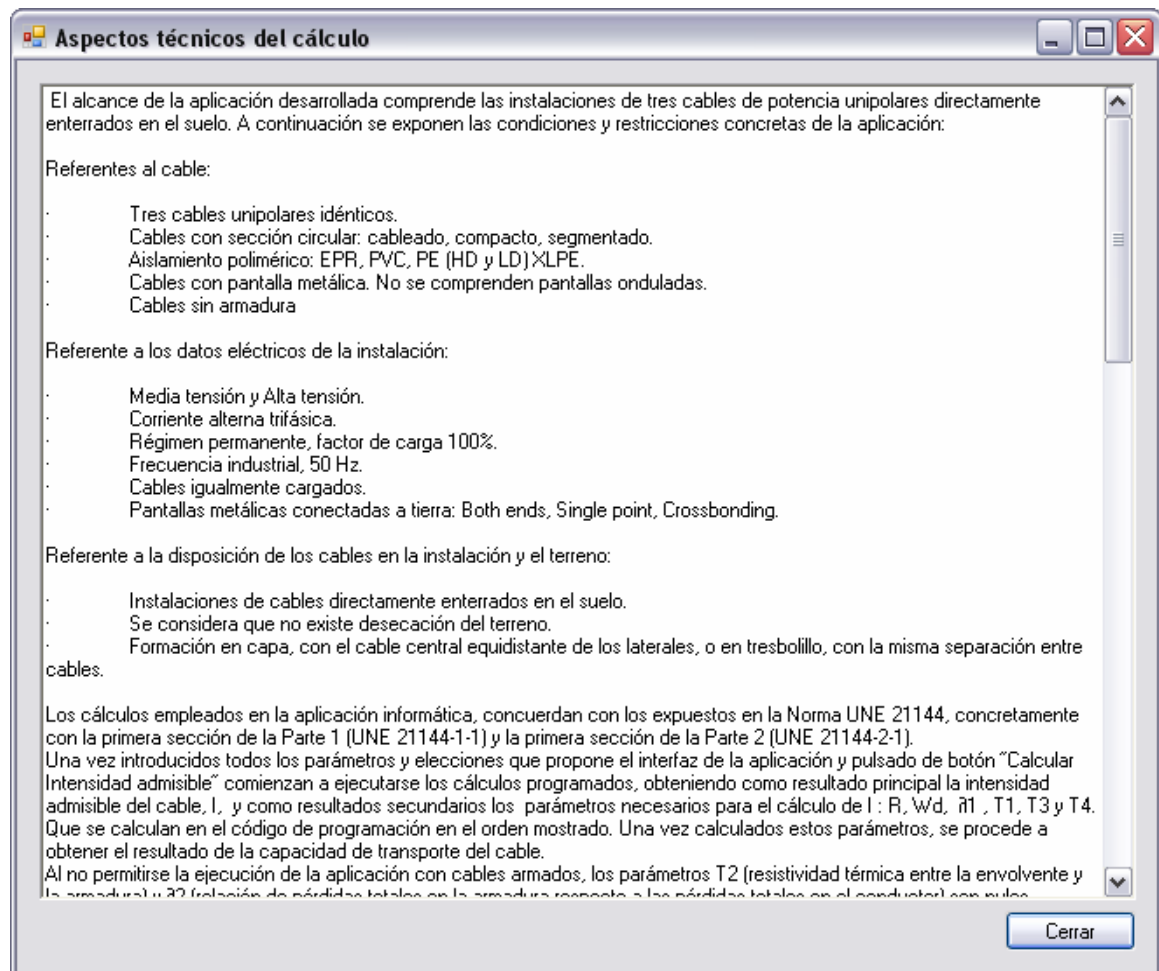


Figura 24. Ventana: Aspectos técnicos del cálculo

3.1.4 Ventana Resultados

En esta ventana se muestran los parámetros más relevantes calculados por la aplicación informática según las especificaciones introducidas.

La información principal que se obtiene es la intensidad admisible del cable en la instalación definida. También se muestran los parámetros necesarios para el cálculo de esta corriente:

- R: resistencia eléctrica del conductor a su temperatura máxima de servicio, en Ω/m .
- W_d : pérdidas dieléctricas por unidad de longitud y por fase, en W/km
- λ_1 : relación de pérdidas en la pantalla respecto a las pérdidas en el conductor
- T_1 : resistencia térmica por fase entre conductor y envolvente, en $\text{K}\cdot\text{m}/\text{W}$
- T_2 : resistencia térmica entre envolvente y armadura, en $\text{K}\cdot\text{m}/\text{W}$
- T_3 : resistencia térmica del revestimiento o cubierta exterior, en $\text{K}\cdot\text{m}/\text{W}$
- T_4 : resistencia térmica del medio externo, en $\text{K}\cdot\text{m}/\text{W}$

Adicionalmente se muestran valores informativos del cable e instalación seleccionados: profundidad de tendido, separación entre cables, tensión fase-tierra y sección del conductor.

Para la formación de los cables en tresbolillo se muestra la mayor intensidad admisible entre los tres cables. Pero para la formación en capa se diferencia cada una de las intensidades admisibles correspondientes a cada cable, así como las pérdidas en la pantalla de cada uno. Cada una de las intensidades mostradas tiene un subíndice:

- I_1 : para el cable con la fase en retraso respecto al cable central.
- I_m : para el cable central.
- I_2 : para el cable con la fase en adelanto respecto al cable central.

Mediante el botón “Regresar a la pantalla principal” se cierra la ventana de resultados para poder realizar modificaciones o cerrar la aplicación.

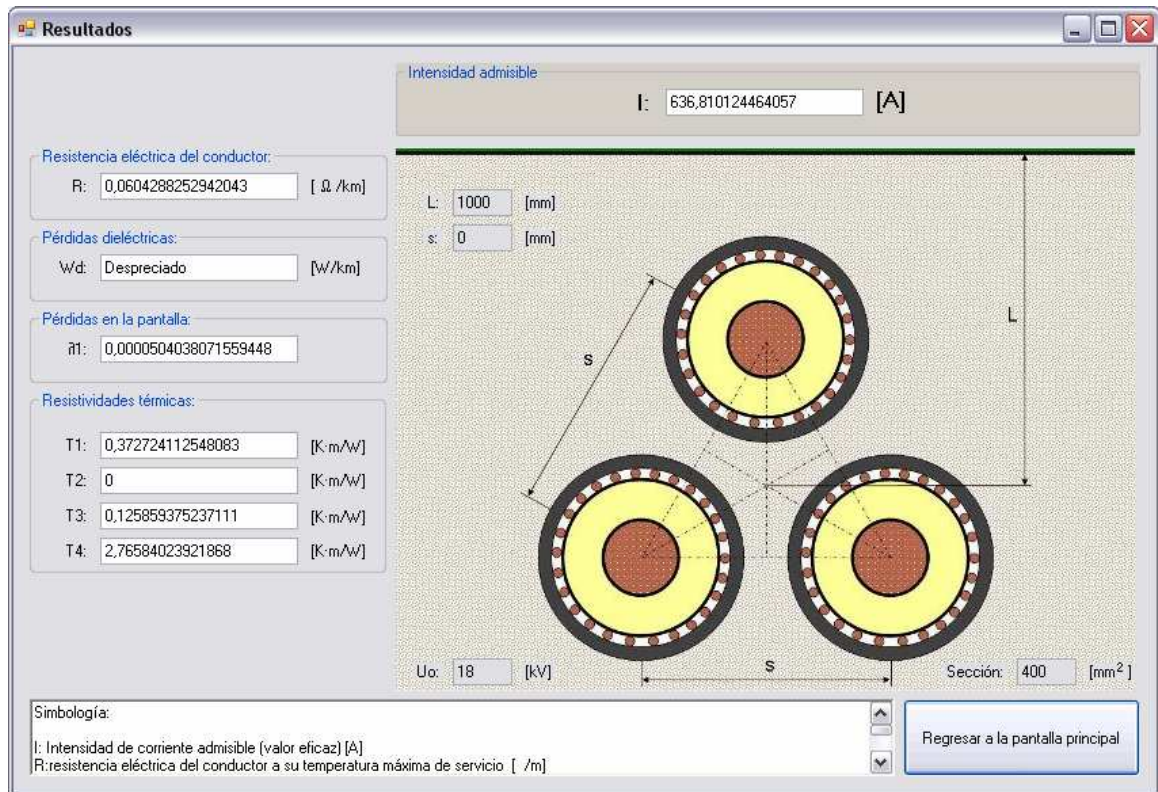


Figura 25. Ventana: Resultados (para disposiciones en tresbolillo)

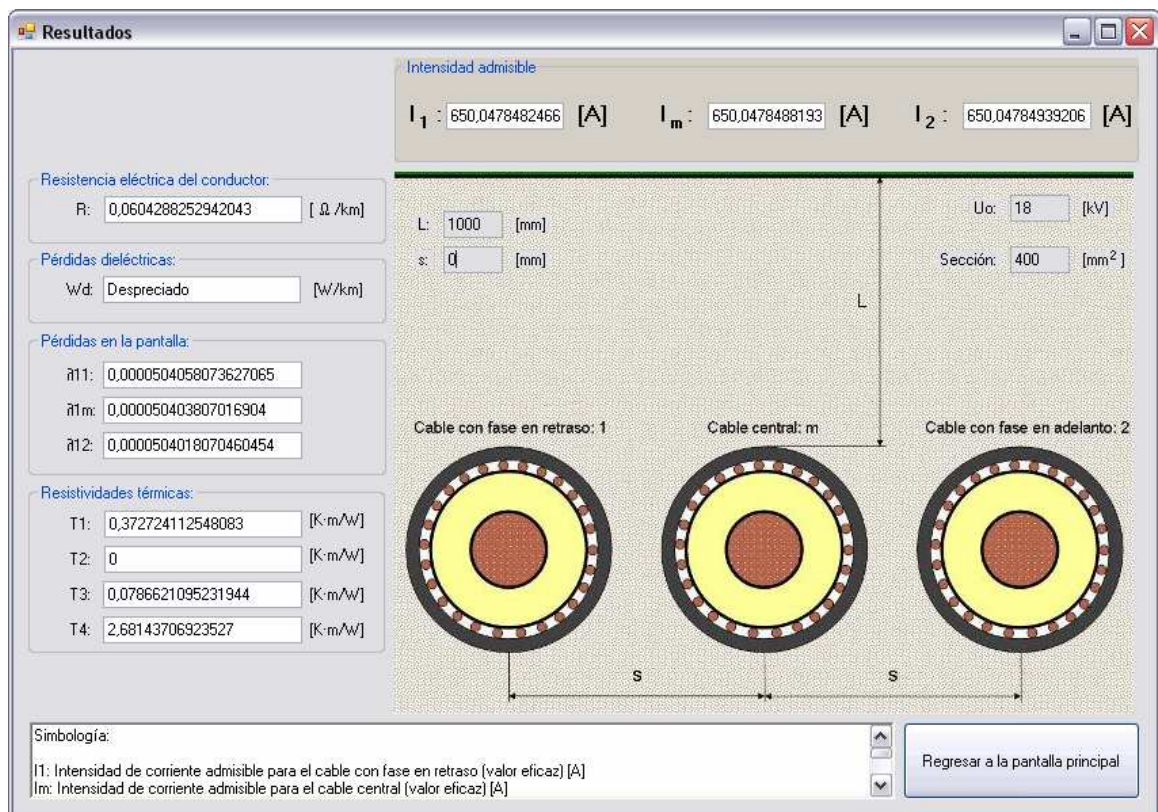


Figura 26. Ventana: Resultados (para disposiciones en capa)

3.2 Aspectos técnicos del cálculo

El alcance de la aplicación desarrollada comprende las instalaciones de tres cables de potencia unipolares directamente enterrados en el suelo. A continuación se exponen las condiciones y restricciones concretas de la aplicación:

Referentes al cable:

- Tres cables unipolares idénticos.
- Cables con sección circular: cableado, compacto, segmentado.
- Aislamiento seco: EPR, PVC, PE (HD y LD) XLPE.
- Cables con pantalla metálica. No se comprenden pantallas onduladas.
- Cables sin armadura

Referente a los datos eléctricos de la instalación:

- Media tensión y Alta tensión.
- Corriente alterna trifásica.
- Régimen permanente, factor de carga 100%.
- Frecuencia industrial, 50 Hz.
- Cables igualmente cargados.
- Pantallas metálicas conectadas a tierra: Both ends, Single point, Crossbonding.

Referente a la disposición de los cables en la instalación y el terreno:

- Instalaciones de cables directamente enterrados en el suelo.
- Se considera que no existe desecación del terreno.
- Formación en capa, con el cable central equidistante de los laterales, o en tresbolillo, con la misma separación entre cables.

Los cálculos empleados en la aplicación informática, concuerdan con los expuestos en la Norma UNE 21144, concretamente con la primera sección de la Parte 1 (UNE 21144-1-1) y la primera sección de la Parte 2 (UNE 21144-2-1).

Una vez introducidos todos los parámetros y elecciones que propone el interfaz de la aplicación y pulsado de botón “Calcular Intensidad admisible” comienzan a ejecutarse los cálculos programados, obteniendo como resultado principal la intensidad admisible del cable, I , y como resultados secundarios los parámetros necesarios para el cálculo de I : R , W_d , λ_1 , T_1 , T_3 y T_4 . Que se calculan según el código de programación en el orden mostrado. Una vez calculados estos parámetros, se procede a obtener el resultado de la capacidad de transporte del cable.

Al no permitirse la ejecución de la aplicación con cables armados, los parámetros T_2 (resistividad térmica entre la envolvente y la armadura) y λ_2 (relación de pérdidas totales en la armadura respecto a las pérdidas totales en el conductor) son nulos.

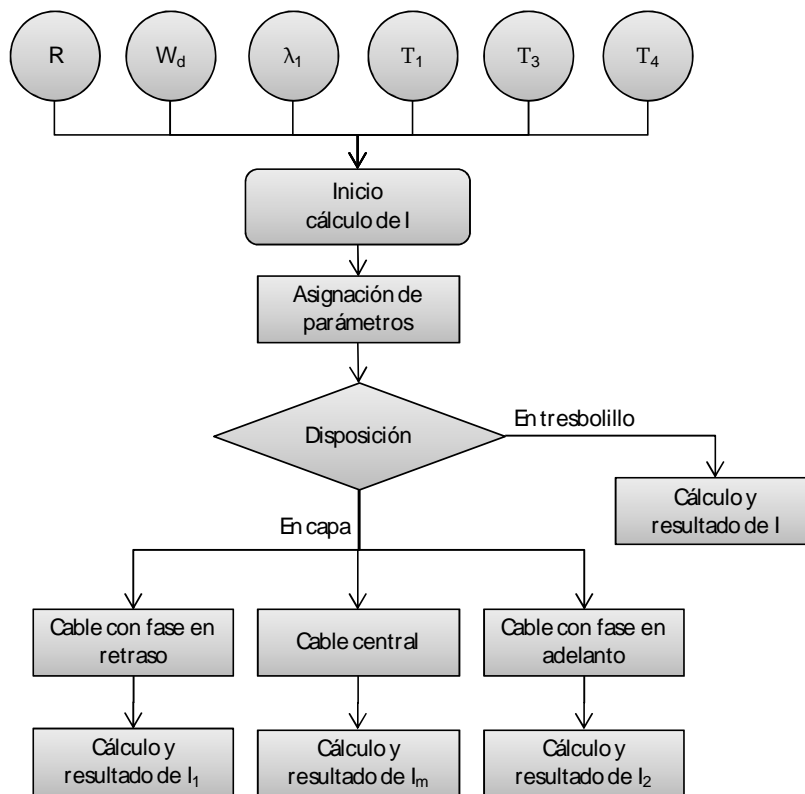


Figura 27. Esquema del cálculo de Intensidad admisible

A continuación se detallan los cálculos de los resultados secundarios de la aplicación:

3.2.1 Cálculo de R

El cálculo de la resistencia eléctrica del conductor, R , comienza con la asignación de la resistividad eléctrica, ρ y el coeficiente de variación de la resistividad en función de la temperatura, α_{20} , a partir de la elección de material realizada por el usuario. A continuación se calcula R_0 y posteriormente R' mediante los valores introducidos por el usuario.

Para el cálculo del factor de efecto pelicular, y_s primero es necesario calcular x_s , asignándole un factor k_s que depende del tipo de conductor seleccionado. Según la norma, x_s no puede ser superior a 2,8. En tal caso en la aplicación aparece el siguiente mensaje: “Factor de efecto pelicular elevado; $x_s > 2,8 \rightarrow$ Mirar Norma UNE 21144-1-1 punto 2.1”.

El cálculo factor de efecto proximidad, y_p es análogo al anterior, el aviso mostrado es: “Factor de efecto proximidad elevado; $x_p > 2,8 \rightarrow$ Mirar Norma UNE 21144-1-1 punto 2.1”.

Una vez calculados y_s e y_p la aplicación procede a calcular R .

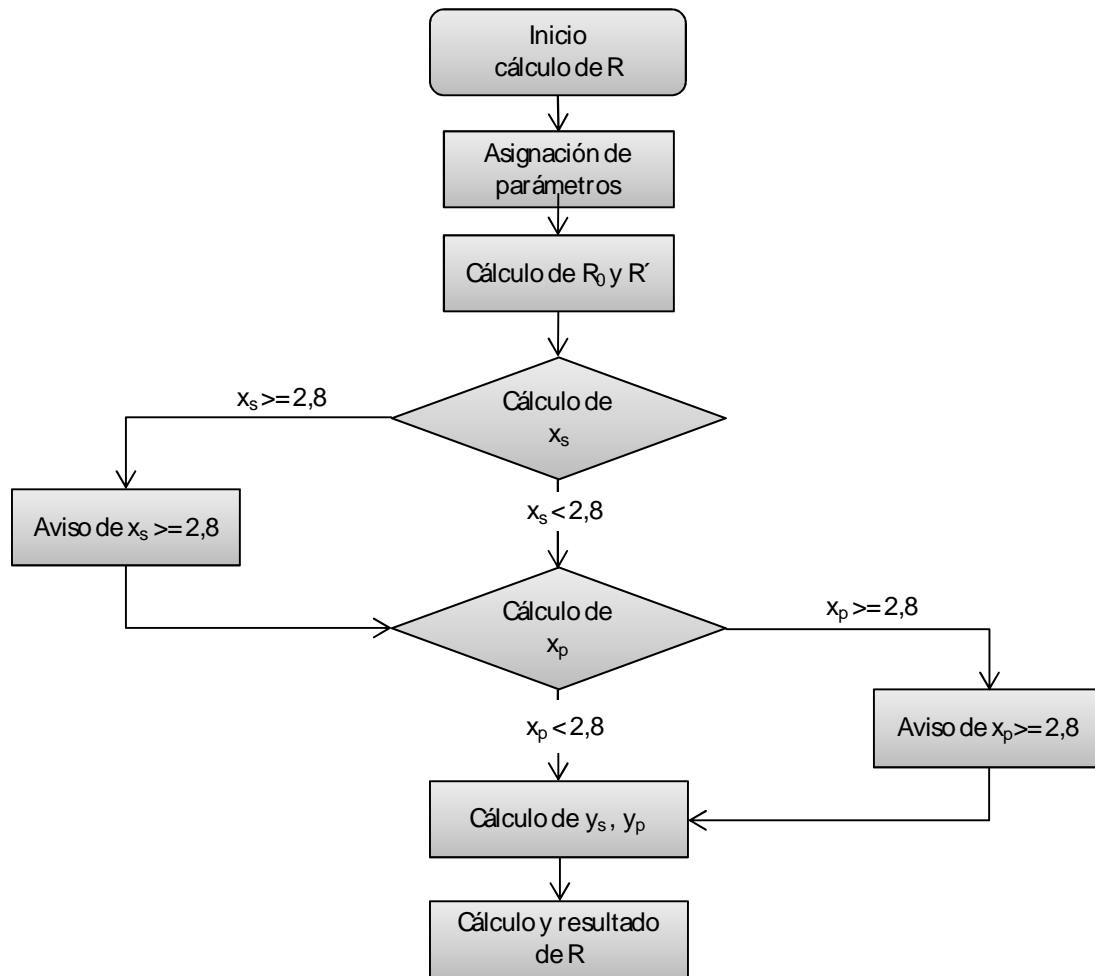


Figura 28. Esquema del cálculo de R

El valor de R_0 no se ha obtenido de las tablas o métodos expuestos en la Norma UNE-EN 60228, como indica la normativa, sino que se ha realizado una aproximación que consiste dividir la resistividad del conductor entre su sección. De esta forma se pueden realizar cálculos para cables con secciones no normalizadas.

3.2.2 Cálculo de W_d

Mediante la selección del material aislante y el valor de tensión fase tierra, U_0 a través del interfaz de la aplicación, se asignan unos valores de permisividad relativa, ε y factores de pérdidas del aislamiento, $\tan \delta$. Con estos parámetros se calcula la capacidad, C .

Según la Norma, solo deberán tenerse en cuenta las pérdidas dieléctricas a partir de un cierto valor de U_0 tabulado para cada material aislante. En función del valor de U_0 introducido, se desprecian o se calculan las pérdidas dieléctricas.

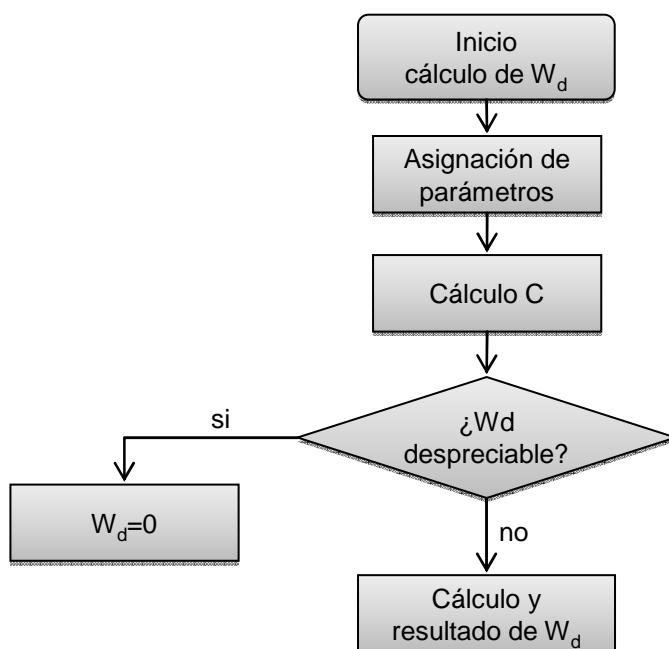


Figura 29. Esquema del cálculo de W_d

3.2.3 Cálculo de λ_1

El código que permite calcular las pérdidas en la pantalla comienza de forma similar al de R , para el material de la pantalla seleccionado, se asigna una resistividad eléctrica, ρ y el coeficiente de variación de la resistividad en función de la temperatura, α_{20} . Con esto se calcula la resistividad en corriente continua de la pantalla a 20°C, R_{0s} y la resistencia en corriente continua a la temperatura máxima de servicio de la pantalla, R'_s .

Adicionalmente se calcula las reactancias X y X_m y el factor de efecto pelicular en la pantalla eléctrica. Con estos resultados puede calcularse la resistencia de la pantalla metálica R_s .

Las ecuaciones para el cálculo de las pérdidas en la pantalla son diferentes, en función de la conexión de ésta y la disposición de los cables. La aplicación sigue la secuencia que puede observarse en el esquema mostrado a continuación.

Para configuraciones en tresbolillo se considera que los tres cables tienen las mismas pérdidas en la pantalla. Pero en formaciones en capa, para cada cable se obtienen unas pérdidas distintas, llamadas λ_{11} , λ_{1m} y λ_{12} , para cables con fase en retraso, cable central y cable con fase en adelante respectivamente.

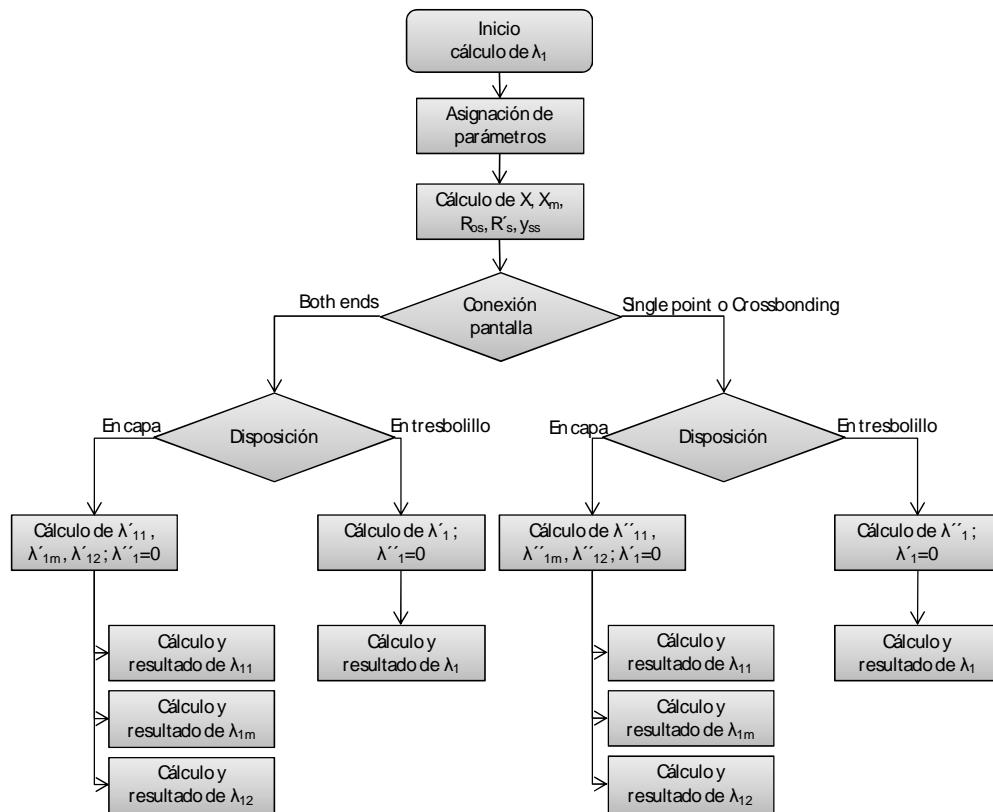


Figura 30. Esquema del cálculo de λ_1

El método para calcular R_s no está especificado en la norma, por lo que se ha optado por realizar un cálculo análogamente al de R .

No se han tenido en consideración los apartados 2.3.4, 2.3.5 y 2.3.6.2 de la primera sección de la Norma UNE 21144-1-1.

3.2 Aspectos técnicos del cálculo

En el primero de ellos trata del posible aumento de las corrientes de circulación por la pantalla cuando existe una variación de la separación de los cables a lo largo de la instalación, para cables con pantallas conectadas a tierra en ambos extremos.

En el segundo apartado señala que no pueden despreciarse las corrientes de Foucault en la pantalla metálica en conductores segmentados de gran sección cuyos segmentos están aislados entre sí.

Por último no se han considerado las posibles pérdidas en la pantalla por corrientes de circulación para instalaciones de cables con pantallas permutadas cuyo desequilibrio no es despreciable, con separaciones entre puestas a tierra de diferente longitud.

3.2.4 Cálculo de T_1 y T_3

Los cálculos de resistencia térmica del aislante, T_1 y la resistencia térmica de la cubierta exterior, T_3 , son semejantes entre sí. En ambos casos con la selección de material del componente y los datos dimensionales introducidos por el usuario, la aplicación asigna la resistividad térmica correspondiente y obtiene la resistencia térmica.

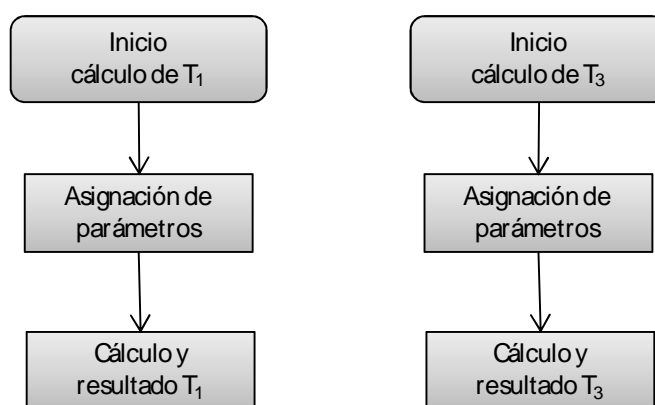


Figura 31. Esquema del cálculo de T_1 y T_3

3.2.5 Cálculo de T_4

Como se ha citado anteriormente, el alcance de la aplicación desarrollada solo abarca instalaciones directamente enterradas, lo que reduce la diversidad de fórmulas facilitadas por la Norma para calcular la resistividad térmica externa.

Por medio del interfaz de la aplicación, el usuario distingue si en la instalación los cables están en contacto así como la configuración de estos, en tresbolillo o en capa.

Cuando los cables se encuentran en contacto, se calcula la resistencia térmica externa a partir de la profundidad de tendido, L , el diámetro exterior del cable, D_e y la resistividad térmica del terreno. Para formaciones en tresbolillo adicionalmente al cálculo de T_4 se multiplicará por un factor de 1,6 la resistencia térmica de la cubierta exterior, T_3 , calculada anteriormente.

En el caso de cables separados, la aplicación realiza cálculos trigonométricos para obtener las distancias entre los cables y sus proyecciones sobre el aire, y así poder efectuar el cálculo de T_4 conforme al apartado 2.2.3.2 de la primera sección de la Norma UNE 21144-2-1. Estos cálculos se realizar a partir de la profundidad de tendido y la separación entre cables, s .

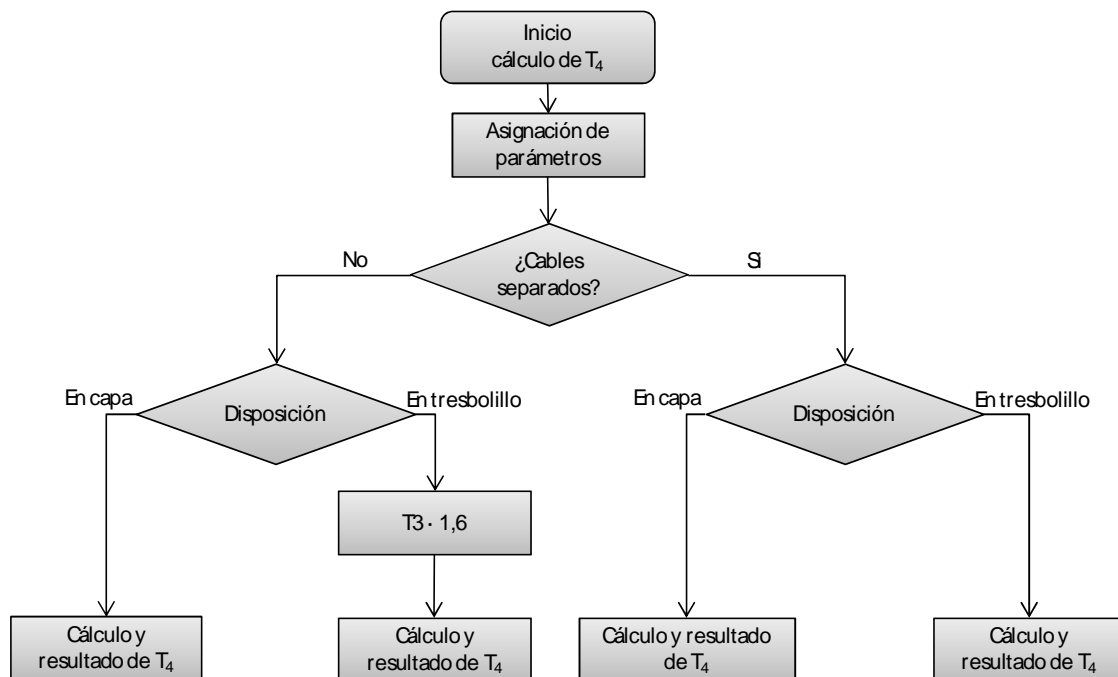


Figura 32. Esquema del cálculo de T_4

En el caso de instalaciones con cables en contacto en formación de tresbolillo no se ha considerado que, en el caso específico de cables parcialmente recubiertos por una pantalla de alambres colocada helicoidalmente que cubra entre un 20% y un 50% de la circunferencia del cable, la Norma especifica que la resistencia térmica del aislamiento, T_I debe multiplicarse por un factor de 1,07 o 1,16.

Capítulo 4

Validación de la aplicación

4.1 Validación

Para realizar una validación de la aplicación desarrollada, concretamente de la respuesta a la variación de los parámetros concernientes al terreno, se ha realizado una comparativa entre los resultados obtenidos por la aplicación informática y las intensidades admisibles obtenidas por medio de la Norma UNE 211435 (norma que establece una guía para la elección de cables eléctricos de tensión asignada superior a 0,6/1 kV).

En esta norma, se tabulan las intensidades admisibles para cables con tensiones comprendidas entre 0,6/1 kV y 18/30 kV para instalaciones de cables en tresbolillo en contacto. La intensidad admisible puede obtenerse a partir de tablas, en función de la tensión asignada, el material del conductor y del aislamiento y la sección del conductor. En la *Tabla 1* pueden verse las intensidades admisibles para cables de distribución de 3,6/6 kV a 18/30 kV con aislamiento de XLPE y conductor de cobre.

Intensidad máxima admisible en A Aislamiento de XLPE. Conductor de cobre Cables unipolares en triángulo en contacto			
Sección mm²	Directamente soterrados	En tubular soterrada	Al aire, protegido del sol
25	130	120	155
35	155	145	185
50	180	170	220
70	225	205	275
95	265	245	335
120	300	280	385
150	340	315	435
185	380	355	500
240	440	415	590
300	490	460	680
400	560	520	790
Temperatura del terreno en °C			25
Temperatura del aire en °C			40
Resistividad térmica del terreno K · m/W			1,5
Profundidad de soterramiento en m			1
Temperatura del conductor en °C			90

Tabla 1. Cables de distribución de 3,6/6 kV a 18/30 kV. Aislamiento XLPE y conductor de cobre. Norma UNE 211435

A estas intensidades se le deberá aplicar un factor de corrección en el caso de que varíe la profundidad de la instalación, L , la temperatura del terreno, T_{amb} o la resistividad térmica del terreno, $\rho_{terreno}$, respecto al valor tipo establecido.

Las condiciones tipo según la Norma UNE 211435 se muestran en la siguiente tabla:

Temperatura del aire ambiente	40 °C (sea en galerías o al aire libre).
Temperatura del terreno	25 °C
Profundidad de soterramiento	0,7 m para 0,6/1 kV; 1 m para tensiones superiores
Radiación solar	Los cables en galerías están protegidos del sol. Los cables de red aérea están expuestos a una radiación solar de 1 000 W/m ²
Agrupamiento de circuitos	Un solo circuito trifásico alejado de otras fuentes de calor
Conexión de las pantallas	Directamente a tierra en ambos extremos de la línea
Sección de la pantalla	16 mm ² formada por 20 alambres de 1mm de diámetro aproximadamente
Resistividad térmica del terreno	1,5 K · m/W

Tabla 2. Condiciones tipo de instalación reglada por la Norma UNE 211435

Para obtener la intensidad admisible de la aplicación informática, se ha seleccionado unos parámetros que cumplan con las condiciones tipo mencionadas anteriormente, tanto

4.1 Validación

los parámetros de la instalación como la selección de un cable de la “Librería de cables” de la aplicación acorde:

- CU EPROTENAX-H COMPACT 18/30 kV $S=400 \text{ mm}^2$: Cable unipolar de conductor de cobre compacto, aislamiento principal de HEPR, con pantalla de hilos de cobre en hélice de 16 mm^2
- AL EPROTENAX-H COMPACT 18/30 kV $S=400 \text{ mm}^2$: Cable unipolar de conductor de aluminio compacto, aislamiento principal de HEPR, con pantalla de hilos de cobre en hélice de 16 mm^2

En la Tabla 3 puede observarse la diferencia entre la intensidad admisible obtenida por las correspondientes tablas de por la Norma y la intensidad admisible calculada por la aplicación para los dos cables propuestos:

	I (tabulada)[A]	I (aplicación)[A]
CU EPROTENAX-H COMPACT 18/30 kV	600	636,81
AL EPROTENAX-H COMPACT 18/30 kV	470	503,29

Tabla 3. Diferencias entre intensidad admisible de la Norma UNE 211435 y la calculada.

Para valorar la influencia del cambio de parámetros de la instalación, se han comparado varios valores para la profundidad de la instalación, la temperatura del terreno y la resistividad térmica del terreno, tanto calculados por la aplicación como aplicando los correspondientes factores de corrección a la intensidad admisible tabulada en la Norma UNE 211435.

4.1.1 Variación de la temperatura del terreno

En las siguientes tablas y gráficas se muestra la variación de intensidades en función de la temperatura del terreno:

T [°C]	CU EPROTENAX-H COMPACT 18/30 kV		AL EPROTENAX-H COMPACT 18/30 kV	
	I (tabulada)[A]	I (aplicación)[A]	I (tabulada)[A]	I (aplicación)[A]
10	654,00	693,95	512,30	548,44
15	636,00	675,44	498,20	533,82
20	618,00	656,41	484,10	518,78
25	600,00	636,81	470,00	503,29
30	582,00	616,59	455,90	487,31
35	564,00	595,68	441,80	470,78
40	540,00	574,01	423,00	453,66
45	522,00	551,49	408,90	435,86
50	498,00	528,02	390,10	417,30

Tabla 4. Variación de intensidades en función de la temperatura del terreno

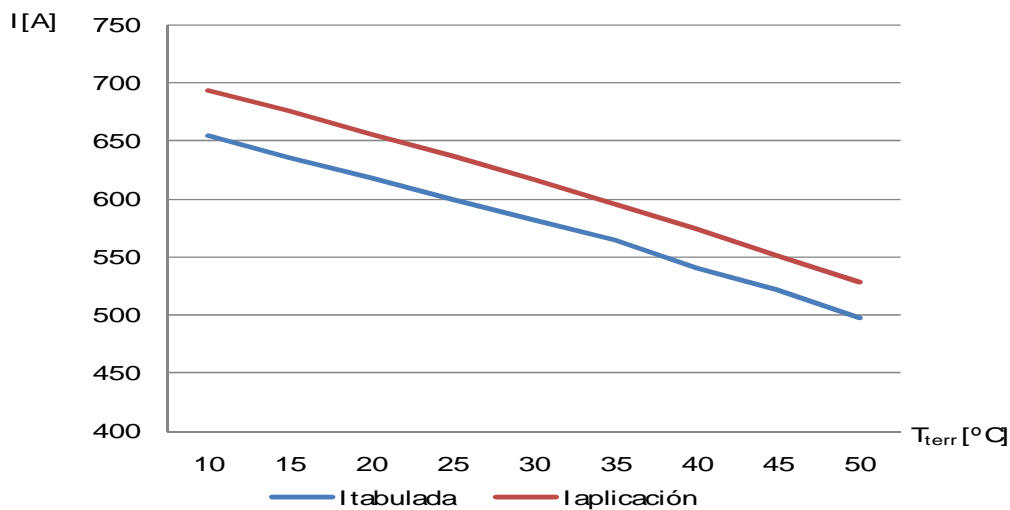


Figura 33. Comparativa de intensidades en función de la temperatura del terreno para el cable de cobre.

4.1 Validación

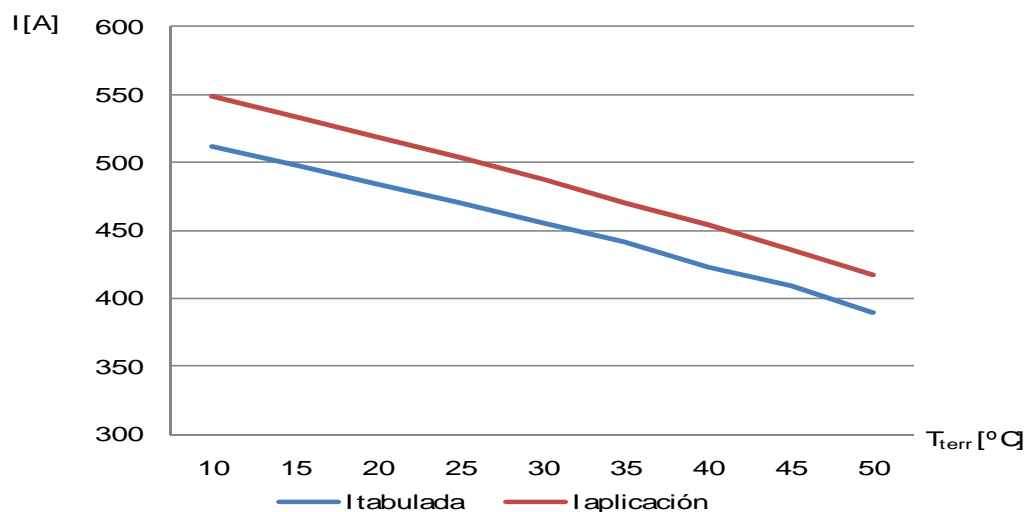


Figura 34. Comparativa de intensidades en función de la temperatura del terreno para el cable de aluminio.

4.1.2 Variación de la resistividad térmica del terreno

A continuación se expone la variación de intensidades en función de la resistividad térmica del terreno:

ρ [K·m/W]	CU EPROTENAX-H COMPACT 18/30 kV		AL EPROTENAX-H COMPACT 18/30 kV	
	I (tabulada)[A]	I (aplicación)[A]	I (tabulada)[A]	I (aplicación)[A]
0,8	780,00	818,98	611,00	646,53
0,9	744,00	783,21	582,80	618,44
1	714,00	751,75	559,30	593,73
1,5	600,00	636,81	470,00	503,29
2	528,00	562,33	413,60	444,60
2,5	474,00	509,07	371,30	402,58
3	438,00	468,54	343,10	370,59

Tabla 5. Variación de intensidades en función de la resistividad térmica del terreno del terreno

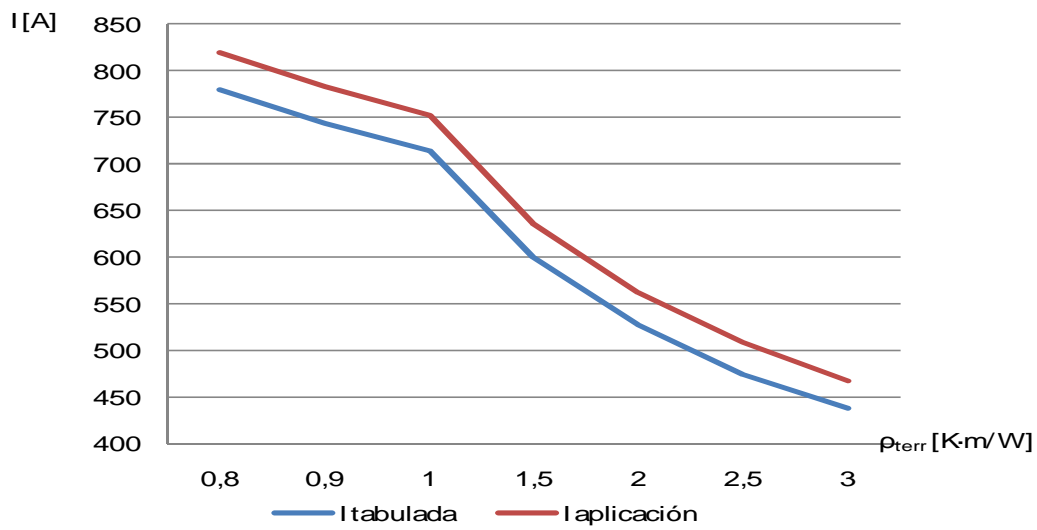


Figura 35. Comparativa de intensidades en función de la resistividad térmica del terreno para el cable de cobre.

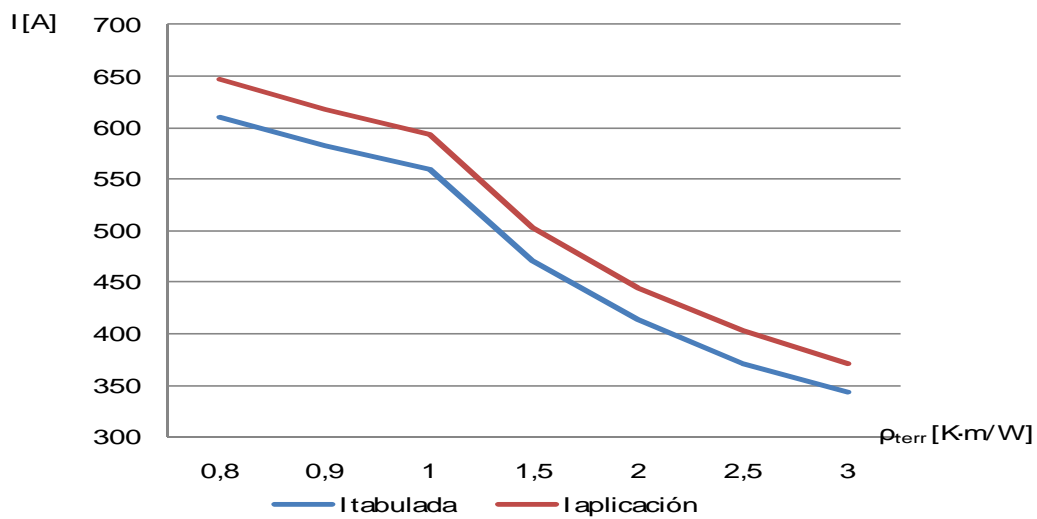


Figura 36. Comparativa de intensidades en función de la resistividad térmica del terreno para el cable de aluminio.

4.1 Validación

4.1.3 Variación de la profundidad de tendido

Por último, se muestra la variación de intensidades en función de la resistividad térmica del terreno:

L [m]	CU EPROTENAX-H COMPACT 18/30 kV		AL EPROTENAX-H COMPACT 18/30 kV	
	I (tabulada)[A]	I (aplicación)[A]	I (tabulada)[A]	I (aplicación)[A]
0,5	654,00	691,56	512,30	546,53
0,6	642,00	675,80	502,90	534,09
0,8	618,00	652,99	484,10	516,07
1	600,00	636,81	470,00	503,29
1,25	588,00	621,77	460,60	491,41
1,5	576,00	610,25	451,20	482,30
1,75	564,00	600,98	441,80	474,99
2	558,00	593,29	437,10	468,91
2,5	546,00	581,08	427,70	459,26
3	534,00	571,63	418,30	451,80

Tabla 6. Variación de intensidades en función de la de tendido

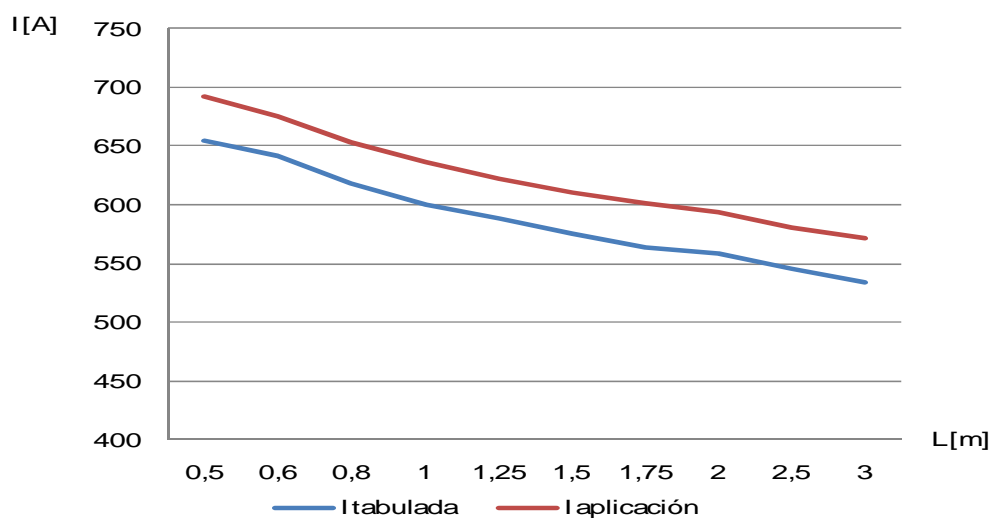


Figura 37. Comparativa de intensidades en función de la profundidad de tendido para el cable de cobre.

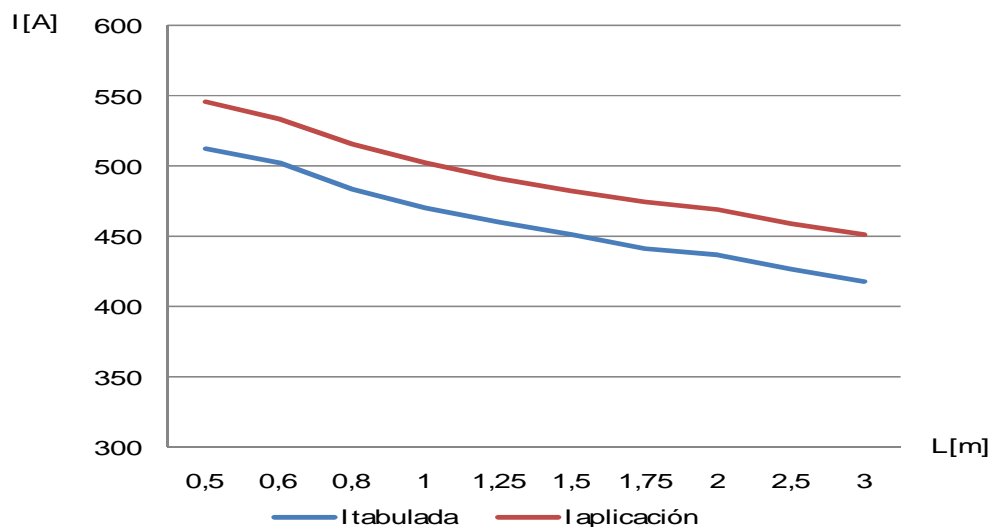


Figura 38. Comparativa de intensidades en función de la profundidad de tendido para el cable de aluminio.

4.2 Resultados

Como puede observarse en las tablas y gráficas del apartado anterior, existe una diferencia entre la intensidad admisible calculada por la aplicación creada y obtenida de la Norma UNE 211435 (la desviación ronda el 6% del valor total de la intensidad). En la Tabla 7 puede observarse la desviación media para cada cable estudiado, en función de los parámetros variados anteriormente:

	Desviación media entre intensidades [A]		
	$\Delta T_{\text{terreno}}$	$\Delta \rho_{\text{terreno}}$	ΔL
CU EPROTENAX-H COMPACT 18/30 kV	34,93	36,10	35,62
AL EPROTENAX-H COMPACT 18/30 kV	31,66	32,66	32,27

Tabla 7. Desviación media de intensidades para ambos cables

Gran parte de esta diferencia de intensidades se debe a que la resistencia eléctrica de corriente continua a 20°C, R_0 , no ha sido obtenida mediante los listados ni por métodos de medida representados en la Norma UNE-EN 60228, sino que se ha calculado a través de la aplicación informática, como se indica en la sección 3.2.1.

4.2 Resultados

A continuación se muestra el valor de R_0 obtenido de la Norma UNE-EN 60228 frente al valor de R_0 calculado por la aplicación para el caso estudiado anteriormente:

	R_0 Norma 211022 [Ω/km]	R_0 calculada [Ω/km]
CU EPROTENAX-H COMPACT 18/30 kV	0,0470	0,0431
AL EPROTENAX-H COMPACT 18/30 kV	0,0778	0,0707

Tabla 8. R_0 obtenido de la Norma UNE-EN 60228 frente a R_0 calculado por la aplicación

La repercusión de estas diferencias de resistencia, provoca gran parte de la desviación entre las intensidades del apartado anterior.

	I (tabulada)[A]	I (R_0 Norma)[A]	I (aplicación)[A]
CU EPROTENAX-H COMPACT 18/30 kV	600,00	612,07	636,81
AL EPROTENAX-H COMPACT 18/30 kV	470,00	480,42	503,29

Tabla 9. Repercusión de R_0 sobre las intensidades obtenidas

Si se utilizase a resistencia R_0 publicada por la Norma UNE-EN 60228 en la aplicación, la desviación entre la intensidad tabulada en la Norma UNE 211435 y la calculada por la aplicación se vería reducida en torno a 10 A. Esto supondría minimizar la desviación del 6% al 2% aproximadamente.

Conclusiones

El desarrollo de una aplicación que abarcara el cálculo de intensidad admisible para todo tipo de cables supondría realizar un esfuerzo muy importante sin tener claro si se van a lograr los objetivos, por ello se ha tratado de realizar el estudio de un tipo de instalaciones de uso habitual para valorar los resultados y posteriormente determinar si se amplía esta aplicación.

Una vez realizado todo el proyecto podemos llegar a las siguientes conclusiones: la aplicación informática facilita los cálculos de intensidad admisible en cables de potencia, para el alcance de la aplicación, de forma rápida, intuitiva y económica. Esta facilidad tiene como contrapartida un pequeño margen de tolerancia (desviación del 6%) como se ha mostrado en el Capítulo 4, respecto a cálculos realizados por otros medios; no obstante puede ser muy útil para hacer un primer estudio general.

Referencias

AENOR. UNE 21144-1. “*Cables eléctricos. Cálculo de la intensidad admisible- Parte 1: Ecuaciones de intensidad admisible (factor de carga 100%) y cálculo de pérdidas*”. Mayo 1997.

AENOR. UNE 21144-2. “*Cables eléctricos. Cálculo de la intensidad admisible- Parte 2: Resistencia térmica*”. Mayo 1997.

AENOR. UNE 21144-3. “*Secciones sobre condiciones de funcionamiento*”. Mayo 1997.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 60287. “Electric cables - Calculation of the current rating”. Diciembre 2006.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 60228. “*Conductors of insulated cables*”. Noviembre 2004.

MANUEL LLORENTE. “*Cables Eléctricos Aislados. Descripción y aplicaciones prácticas*”. 1994.

JUAN PRIETO. “*Curso: Proyecto y construcción de infraestructuras eléctricas de Alta tensión. Tema: Tecnología de líneas de cables aislados*”

JOSÉ GARCÍA TRASANCOS. “*Instalaciones eléctricas en media y baja tensión*”. 5ª Edición, 2006.

GILBERTO E. MEJÍA, GERMAN E. CUBILLOS. “*Proyecto: Análisis y evaluación a herramienta computacional aplicada al cálculo para la selección de cableado eléctrico subterráneo*”. 2011

UC3M-UNION FENOSA. “*Gestión de redes eléctricas. Líneas eléctricas subterráneas de A.T.*”

PRYSMIAN CABLES & SYSTEM: *“Catálogo: Cables y accesorios para Media Tensión”*. 2009

PETER G. AITKEN. *“Visual Basic 6. Manual Completo de Programación”*. 2001.

EVERTS GARAY GAITAN. *“Paseo por Visual Basic 2008”*.

